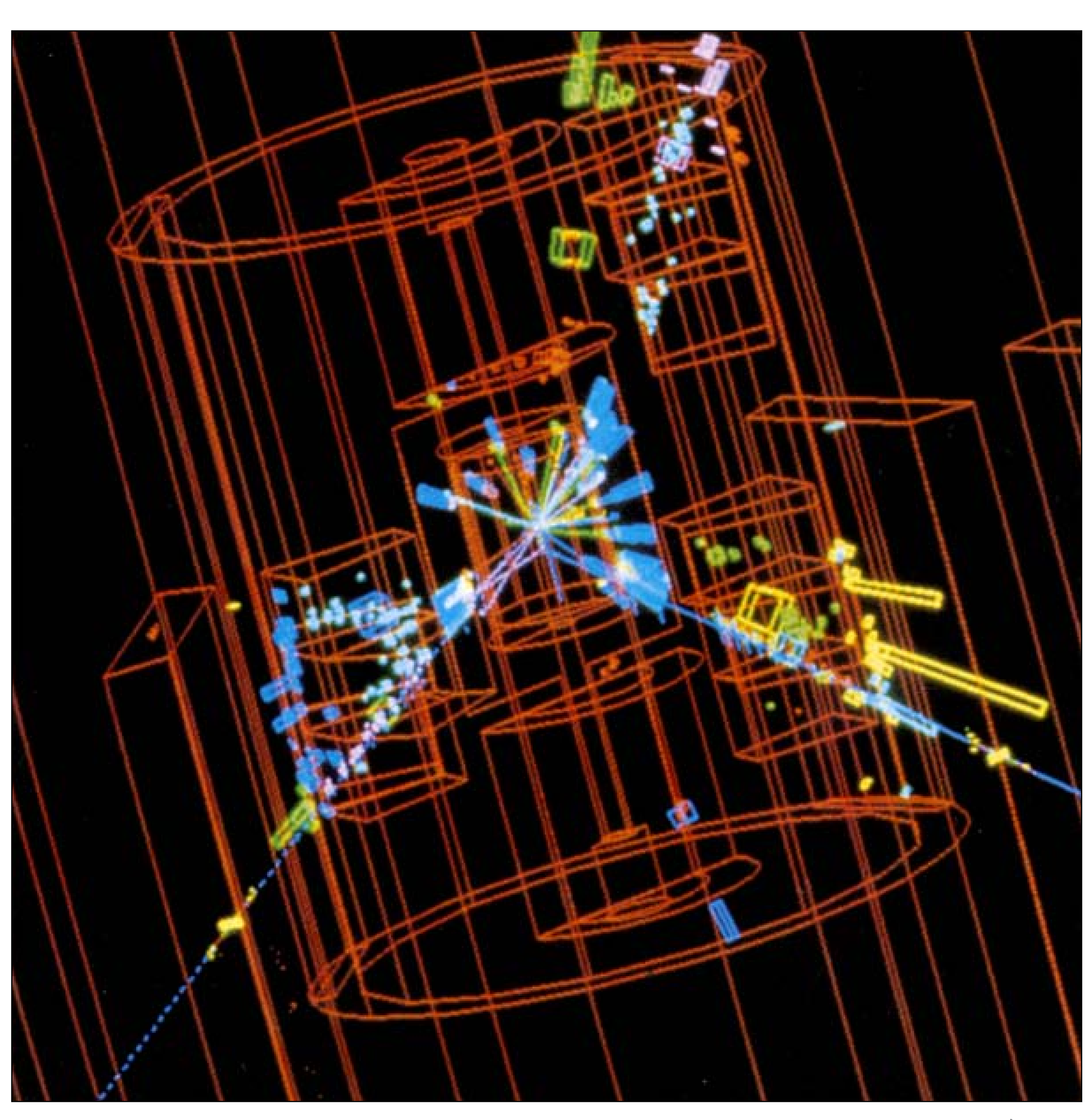
INVESTIGACION y CIENCIA

¿HACIA DONDE VA LA GENETICA?

COLISION DE GALAXIAS

RESURGIMIENTO DE LA PSEUDOCIENCIA EN LA URSS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



EL VUELO DE LAS PARTÍCULAS

OCTUBRE 1991
600 PTAS.

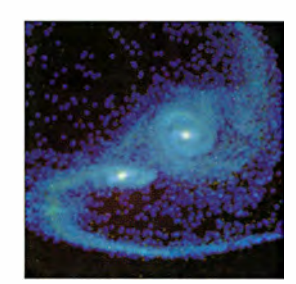


Octubre de 1991 Número 181

6 

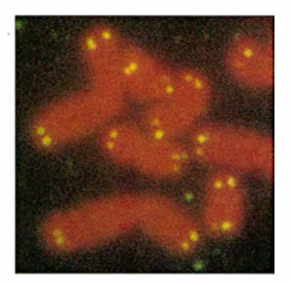
Tendencias anticientíficas en la Unión Soviética
Sergei Kapitza

Los drásticos cambios puestos en marcha por Mijail Gorbachov con sus campañas de *glasnost* y *perestroika* han tenido una extraña consecuencia: que los sentimientos contrarios a la ciencia y a la técnica vayan en auge en la Unión Soviética. La sociedad responde a la crisis dándose a la percepción extrasensorial, la astrología y las sectas.

14 

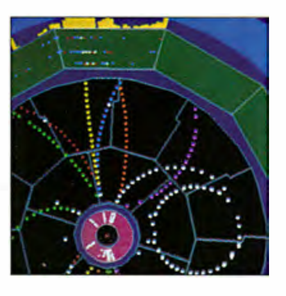
Colisiones entre galaxias
Joshua Barnes, Lars Hernquist y François Schweizer

Las galaxias se mueven y giran en el espacio a velocidades celerísimas. Las colisiones entre ellas son, pues, inevitables. El choque no las torna a repeler, sino que promueve la mutua fusión. Este proceso explica la formación de las gigantescas galaxias elípticas y la activación de los cuásares.

24 

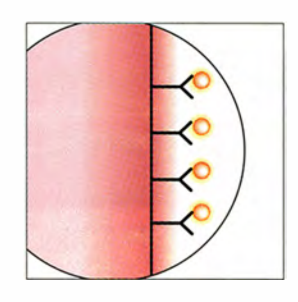
El telómero humano
Robert K. Moyzis

En el lenguage de la genética, *TTAGGG* significa "el extremo". Esta secuencia de nucleótidos, repetida una y otra vez al final de cada cromosoma, constituye un remate protector que impide su degradación o su acortamiento durante la replicación. La secuencia se ha encontrado en unas 100 especies de vertebrados, de los peces al hombre.

44 

Representación de partículas elementales
Horst Breuker, Hans Drevermann, Christoph Grab, Alphonse A. Rademakers y Howard Stone

Un solo "suceso" del gran colisionador electrón-positrón del CERN produce hasta 500.000 bits de datos digitales. Los ordenadores traducen la información en imágenes que ayudan a interpretar la complicada dinámica de las partículas elementales.

50 

Biosensores
Jerome K. Schultz

Tomemos una muestra de pulpa de banana, antena de cangrejo, simiente de pepino o músculo de conejo. Unámosla a un circuito eléctrico o conectémosla a una fibra óptica. El resultado es un sensor en tiempo real para sustancias biológicas de interés, que van desde los niveles de oxígeno o glucosa en la sangre hasta las drogas o contaminantes ambientales.

58 

Lobos de abejas
Howard E. Evans y Kevin M. O'Neill

Las hembras de estas avispas son depredadoras voraces que alimentan a sus larvas abarrotando cámaras subterráneas selladas con abejas paralizadas. Los machos defienden su propio territorio de forma agresiva. Al igual que sus presas, los adultos de ambos sexos se nutren de néctar.

66 

El hombre neolítico y la muerte
Alain Gallay

La inhumación de los muertos constituye un hecho cultural que evoluciona a lo largo del Neolítico. Las variaciones de riqueza en el mobiliario fúnebre y la diversificación de aderezo y acondicionamiento de las tumbas nos hablan de una evolución social concomitante.

76 

TENDENCIAS EN BIOLOGÍA

Genes inteligentes
Tim Beardsley

¿Por qué una rosa es una rosa? ¿Quién le dice a una célula hepática que sea tal? Una computadora genética es la respuesta. Ella ordena cuándo activar o reprimir un gen. La computadora consta de múltiples amasijos de proteínas que armonizan las formas y funciones de las células, transmitiendo señales de dentro y fuera de la célula.

SECCIONES

3 **Hace...**

34 

Ciencia y sociedad

Lengua y epigrafía ibéricas.

41 **Ciencia y empresa**

86 

Juegos matemáticos

Para un monje euclídeo, un reloj de sol digital es una cuestión fractal.

90 **Libros**

96 **Apuntes**

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

José Manuel García de la Mora: *Tendencias anticientíficas en la U.R.S.S*; Manuel Puigcerver: *Colisiones entre galaxias*; Luis Serra: *El telómero humano*; Ramón Pascual: *Representación de partículas elementales*; Amando García: *Biosensores*; Joan-Domènec Ros: *Lobos de abejas*; Luis Bou: *El hombre neolítico y la muerte* y *Juegos matemáticos*; Santiago Torres: *Genes inteligentes*; J. Vilardell: *Hace...*

Ciencia y sociedad:

Luis Silgo y Margarita Garin, Manuel Martín-Bueno; Mercedes Real

Ciencia y empresa:

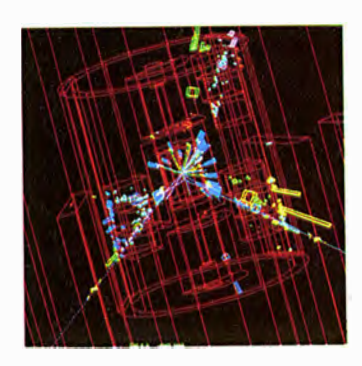
Manuel Puigcerver

Libros:

Albert Dou, Antonio Prevosti, Joaquín del Val y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7-11	Sovfoto, Inc.
15	Joshua Barnes
16-17	Halton C. Arp, Víctor M. Blanco y François Schweizer (*arriba*), Joshua Barnes y Lars Hernquist (*abajo*), Patrick Seitzer y François Schweizer (*abajo, derecha*)
18	Joshua Barnes y Lars Hernquist
19	Michael Goodman
20	Alan M. Dressler (*arriba*), Andrew S. Fruchter (*abajo*)
21	Alan H. Bridle
25	Robert K. Moyzis
26	George Retseck
27	Jason Küffer
28	Patricia J. Wynne; Robert K. Moyzis (*fotografías*)
29	Jason Küffer
30	Robert K. Moyzis
31	Jason Küffer
44-45	Foto CERN
46	Science Photo Library Photo Researchers, Inc.
47	Laboratorio de Servicios Fotográficos Lawrence de Berkeley (*arriba y centro*), Foto CERN (*abajo*)
48	Ian Worpole
49	Foto CERN
50-51	Scott Goldsmith
52-55	Laurie Grace
59	Darryl Gwynne
60-63	Sally Bensusen
64	Howard E. Evans y Kevin M. O'Neill
67	PLS, P. Horber (*arriba*), PLS (*abajo*)
68	Documents PLS
69	J. Guilaine
70	J. L. Voruz (*arriba*), PLS y P. Horber (*abajo*)
71	P. Moinat (*izquierda*), A. Gallay (*centro y derecha*)
72	A. Gallay
74	PLS y P. Horber
75	Documents PLS
76-77	Tomo Narashima
78	Michael Goodman
79	Michael Levine, Manfred Frasch (*abajo, derecha*)
80	Michael Goodman
81	Graeme Mardon (*arriba*), William J. McGinnis (*centro*), Mario R. Capecchi (*abajo*)
82	Charles R. Kissinger y Carl O. Pabo (*izquierda*), Nikola P. Pavletich y Carl O. Pabo (*derecha*)
83	Michael Goodman
84	Robert T. N. Tjian
85	Douglas A. Melton
86-88	Andrew Christie



LA CUBIERTA ilustra la explosión de partículas cuando chocan los electrones y positrones en el detector L3 del CERN. En cada colisión el detector genera 500.000 bits de información. Los autores del artículo "Representación de partículas elementales", publicado en este número, programan los ordenadores a fin de traducir estos datos en imágenes, paso necesario para analizar tales sucesos. Las líneas rojas indican la estructura del detector; las curvas multicolores, las trayectorias de las partículas.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6600	12.000
Extranjero	7300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

— Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona
Tel. 268 45 05 - Fax 268 16 07



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Tecfa. Línea Fotomecánica, Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: "La Caballería dispone de una fuerza mecanizada desde 1931 y la Infantería está experimentando con tanques desde la Guerra Mundial, pero nuestra doctrina acerca del empleo de tanques se basaba en los conceptos de británicos y franceses, quienes subordinan estas fuerzas a formaciones más extensas, normalmente de infantería. La movilidad de ésta, al no estar mecanizada, era sólo del orden de la décima parte. Frente a esto se alzaba la idea alemana de una fuerza de combate cuantiosa y aplastante, una unidad acorazada dotada de todas las armas, capaz de penetrar en las líneas enemigas y conservar el terreno conquistado sin otras ayudas. El éxito de las *schnell truppen* nazis en 1939 y 40 no dejó dudas sobre cuál de ambas teorías era la correcta y el ejército norteamericano comenzó a reorganizar sus unidades mecanizadas en consecuencia."

"¿De dónde procede el petróleo? Si la Tierra nació del Sol, entonces sus elementos componentes tendrían que ser parecidos a los de su progenitor, tal como acontece. Además, un espectroscopio del Observatorio de monte Wilson revelaba recientemente que en la atmósfera solar existen, desde luego, sustancias que son petróleos o muy similares a éstos. Por otra parte, sabemos también que algunos de los meteoritos que caen en la Tierra contienen asfaltos. ¿Por qué no ha de ser lógico suponer que el petróleo pudiera haber llegado a nuestro planeta ya formado? La idea, aunque sugestiva, no casa con los hechos descubiertos por los geólogos ya que, de ser cierta, podría hallarse petróleo en casi cualquier lugar de la Tierra. Sin embargo, sólo abunda en determinadas zonas dentro de rocas de cierto tipo. Se trata de rocas estratificadas, formadas en el transcurso de largas eras tras el nacimiento de la Tierra. La teoría que hoy día se admite como más cercana a la verdad es que el petróleo se formara en los estratos que se depositaron en los fondos de los antiguos mares."

"El extraño fenómeno de la 'catarata de carbohidrato' fue descubierto por la doctora Helen Swift Mitchell, profesora e investigadora de nutrición en la Facultad de Massachusetts. Siguiendo unos métodos de alimentación sencillos ha elevado mucho la concentración de azúcar en la sangre de ratas. Cuando este nivel de azúcar se mantiene durante varias semanas, se desarrollan todas las etapas de las cataratas de tipo humano, tanto seniles como diabéticas."

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: "Escribiendo para *Gentleman's Magazine* (Londres) afirma H. G. Wells: Para el vulgo, la vida comenzó con la ameba, a la que siguieron las medusas, los crustáceos y una masa heterogénea de invertebrados; luego vinieron los auténticos peces y animales anfibios, los reptiles, las aves, los mamíferos y el hombre, principio y remate de la creación. Esto no es lo que la ciencia sostiene. Por el contrario, la biología enseña que la regresión, junto con la progresión, es su componente esencial. Hace tiempo que se conocen casos aislados de degeneración, por más que no se sospechara de la enorme importancia de la degeneración como proceso conformador natural y se tardara en reconocer su absoluta paridad con la evolución."

"Es un hecho establecido que el americano medio come en demasía. Durante el invierno, los excesos de comida puede acumularlos como reserva. En el verano, ese suplemento no hace falta, pero nuestro americano medio, sin pararse jamás a pensar que debe cambiar de dieta para acomodarse a las estaciones, sigue atiborrándose 'hasta las orejas' de carnes de cerdo y vaca, alubias y otras viandas de lo más pesado y nutritivo. *Pues bien, atención, lectores:* Los estómagos no son sacos de caucho que puedan tensarse hasta su límite de resistencia, ni tampoco la sensación de hartazgo total debe tomarse como señal de que hay que levantarse de la mesa. — *S.A.C., Texas Health Journal.*"

"Pregunta A.J.B.: ¿En qué consiste un móvil perpetuo? Poseo un motor de agua que, al ponerse en movimiento, arrastra una rueda hidráulica y el agua que sale de ésta es reenviada al punto inicial. Si he realizado un nuevo descubrimiento, por favor infórmenme en su próximo número. *R.: De funcionar, el aparato que Vd. describe habría que clasificarlo como móvil perpetuo. Sin embargo, nos parece que ahí falta algo.*"

"Cuando una brisa suave pone cóncavas las velas de un buque que estén completamente tendidas, éstas se convierten en unos magníficos conductores del sonido. Un día navegaba un velero frente a la costa brasileña, sin avistar tierra. De pronto, algunos tripulantes advirtieron que al pasar y repasar por un determinado punto oían siempre con gran nitidez el repique de una agradable música de campanas, cual si éstas estuvieran tocando en los alrededores. Meses después, a su retorno a Brasil, los marineros se enteraron de que, en los momentos en que ellos oían aquellos sonidos, las campanas de la catedral de San Salvador, en la costa, habían estado sonando con motivo de la celebración de una fiesta en honor de un santo. El sonido, con el favor de una brisa suave y uniforme, había viajado más de 100 millas por encima del agua encalmada y había sido concentrado por las velas."

"Si se confirma, tal como se cablegrafía, que de las aguas del Neckar se está extrayendo una potencia de 300 caballos para alimentar de energía eléctrica a la exposición de Frankfurt, a 170 km de distancia, con una pérdida sólo del 25 por ciento, ello constituye un acontecimiento de importancia extraordinaria que verosímilmente despierte en otros puntos del globo el mismo interés que en la principal ciudad del Main."

"Nuestro grabado ilustra un notorio adelanto del arte odontológico del que es autor el doctor J. W. Clowes, de Nueva York. La invención consiste en unos rellenos que se insertan entre las caras próximas de muelas contiguas, de tal modo que esos rellenos, o empastes, descansan directamente sobre las encías, estando formados por una masa única de material que une las muelas para que las mismas se sujeten mutuamente."



Un adelanto odontológico.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Tendencias anticientíficas en la U.R.S.S.

Un destacado científico soviético indaga los motivos subyacentes al actual aumento en su país de las sectas, las supersticiones y las protestas contra la técnica

Sergei Kapitza

Los profundos cambios acaecidos recientemente en la Unión Soviética, que asociamos a la *perestroika* y a la política del presidente Mijail S. Gorbachov, han desencadenado, por extraño que parezca, una avalancha de sentimientos anticientíficos y antitecnológicos. Estas actitudes públicas han tenido fuerte expresión en el rechazo a la energía nuclear tras el desastre de Chernobil, en una reacción generalizada contra el progreso tecnológico y en numerosas manifestaciones de irracionalidad y de interés por lo paranormal.

Para comprender semejantes aberraciones sociales se ha de procurar no confundir los síntomas visibles con las causas más hondas del espectacular cambio por el que atraviesa hoy una sociedad que hasta hace bien poco se describía como racional, promotora de la ciencia e, incluso, "científica" simplemente. Dichos síntomas externos son importantes, ante todo, como indicadores de la subyacente crisis; pero quizá sean también claro indicio de una mutación más peligrosa, a la que luego volveré a referirme.

Para situar en perspectiva las tendencias que se dan en la sociedad soviética, hay que comprender la magnitud de la transición por la que el país está pasando. Terminada la guerra fría, hay unos vencedores y un vencido: sabemos quiénes la han ganado —el Japón y Alemania—; no me propongo discutir aquí cómo les va a los EE.UU., pero lo que es indiscutible es que hay un perdedor: la Unión Soviética.

SERGEI KAPITZA es miembro del Instituto de Problemas Físicos de la Academia de Ciencias de la U.R.S.S., profesor del Instituto de Física y Tecnología de Moscú, presidente de la Sociedad de Física de la U.R.S.S. y director de la edición rusa de SCIENTIFIC AMERICAN.

La guerra fue, en verdad, una guerra fría. De haber sido caliente, no habría mucho que decir acerca de ella y apenas quedaría nadie para escucharlo. No obstante, los síntomas de la derrota son muy reales: nuestras tropas, humilladas y maltrechas, se están retirando de todos los frentes; nuestros otrora aliados y clientes nos han abandonado o nos están abandonando a toda prisa... mientras pasan también ellos, a su vez, por rápidos cambios.

Nuestra economía se halla en total bancarrota, con una inflación en aumento y un corrupto sistema distribuidor incapaz de alimentar a la gente. De la economía de planificación centralizada se está pasando a la economía de libre mercado, no sólo porque se espere que ésta sea más eficaz, sino porque el sistema centralizado se orientaba en su mayor parte a fines militares. La derrota militar es una de las principales fuerzas que están incitando a cambiar de economía.

La crisis es también una crisis política. El *ancien régime* se está desmoronando más deprisa que la propia economía. El menoscabo de la autoridad central implica una amenaza directa contra la existencia misma de la Unión de las Repúblicas. En realidad, vínculos económicos tales como la red eléctrica, las comunicaciones, los ferrocarriles y las líneas aéreas, todas las complejas conexiones e interdependencias de un estado altamente industrializado, mantienen junta a la Unión con más fuerza que el evanescente poder de la autoridad central. Hasta podrá darse el caso de que el gobierno central haya de recurrir al último vestigio de poder político —la fuerza militar— para salvar a la Unión.

Hemos de admitir que, tras 70 años de luchar por ella, la finalidad primordial del estado socialista ha quedado anulada. Se acabó aquel gran concepto de una Revolución Socialista y Comunista, de un cambio radical en el mundo entero mediante la combativa implantación universal de tales ideas. Esta es la decisiva batalla que hemos terminado perdiendo y la razón última o el porqué más profundo de nuestra crisis. A ello se debe que tengamos que desmilitarizar tanto nuestra economía como nuestra mentalidad, evolucionando hacia una sociedad democrática.

El concepto de "revolución mundial" se amamanta de la ideología marxista. El hundimiento de este sistema de ideas está motivando la política de la Unión Soviética dentro y fuera del país. Este hundimiento constituye la medida real de nuestra derrota, la dimensión del histórico tránsito por el que estamos pasando. Según las tácitas leyes de la guerra fría, uno reconoce la derrota antes de que se le obligue a someterse por la fuerza, así como la disuasión es el modo de hacer la guerra sin entrar en batalla.

En la Unión Soviética, si bien no nos hemos familiarizado todavía con esta manera de pensar, nos vamos poniendo, por lo menos tácitamente, de acuerdo con ella. Todavía se dicen muchas cosas en apoyo de algunas de las viejas ideas. Nuestra clase militar debe aún rendirse al realismo de su nueva posición. Se hacen tentativas de salvar lo que se pueda del pasado: no son pocas las cosas del socialismo, de la propiedad pública y de la planificación que tienen sentido y que funcionan en muchos países.

En este artículo no voy a entrar en tal debate. Lo que merece la pena mencionar es que algunas de las causas de la crisis soviética son de natu-

raleza más general, especialmente el uso de la fuerza militar como instrumento de la política. En esta tendencia podemos ver una señal de la crisis de la primitiva racionalidad.

Cuestiones racionales en torno a los asuntos públicos y a la concepción de la sociedad las ha habido desde los tiempos más antiguos. Para dar con las raíces del racionalismo moderno bastará con que nos remontemos al siglo XVII. La historia de la ciencia moderna —las ideas de Copérnico y Vesalio, de Kepler y de Galileo, Descartes y Bacon— es parte esencial del desarrollo del pensamiento racional. Con espectaculares efectos, la racionalidad fue aplicada a la mecánica. El notable éxito de la mecánica celeste del sistema solar fue, sin duda, una de las mayores aventuras intelectuales de todos los tiempos.

Estos desarrollos de la ciencia, junto con la emergencia del capitalismo y del comercio a escala mundial y el declinar de la autoridad eclesiástica y monárquica, ocurrieron todos a la vez en Europa. A fin de cuentas, la gran *perestroika* de Europa fue la Reforma, con una guerra de 30 años... que se prolongó, de hecho, durante la mayor parte de aquel siglo. En medio de tal agitación florecieron toda suerte de supersticiones. Apuntaré tan sólo que fue entonces cuando hay constancia de que se quemó vivas o se ahogó a unas 50.000 brujas, más que en cualquier otra época. Como ejemplo de lo que sucedía, a Kepler le costó enormes esfuerzos salvar del suplicio a su propia madre. El final de un milenio de ideología medieval y de una forma de vida no pasó sin estas penosas muestras de malestar e inseguridad social. A menor escala las vemos reaparecer en el mesmerismo antes de la Revolución francesa y en el espiritismo y las supersticiones "científicas" que abundaron durante los profundos y rápidos cambios de la sociedad europea antes de la primera guerra mundial.

El grado en que las manifestaciones externas de la irracionalidad son socialmente indicativas lo ilustra también el movimiento *hippy* que tuvo lugar en los EE.UU. por la época de la guerra del Vietnam. En el verano de 1968, que fue cuando visité por primera vez los EE.UU., volé desde Sidney hasta San Francisco. Aquel mismo domingo me llevaron a Haight-



1. SIGNOS DE LOS TIEMPOS. Pretendidos fenómenos sobrenaturales, como los que tanto se anuncian en la prensa sensacionalista estadounidense y en la de otros países, han empezado a menudear en la U.R.S.S. atrayendo la atención y captando la credibilidad a todos los niveles sociales. Como explicación de esta fotografía, proporcionada por la agencia oficial de noticias Tass, se afirma que esta niña georgiana de 10 años está demostrando sus extraordinarios poderes de atraer objetos metálicos, "desde cucharillas hasta planchas", con las manos.



2. EL "SANADOR EXTRASENSORIAL" ***(sentado a la derecha)*** **asegura que la gruesa mujer con vestido estampado era incapaz de sostenerse en pie y andar por sí sola cuando acudió a su consulta. Después de la primera sesión de tratamiento, no necesitó ya las muletas; ahora puede saltar nada menos que 70 veces seguidas. Y el curandero la exhorta: "Aún puede Vd. hacerlo mejor. De suyo, podría llegar a saltar por lo menos 200 veces."**

Ashbury a ver a los "floridos muchachos".

Las supersticiones, las sectas y los chamanes aparecen con sorprendente coincidencia durante una crisis social. Ahí están hoy la percepción extrasensorial y los OVNIS, la astrología y la clarividencia de tantos adivinos, los cultos esotéricos y los sanadores mesmerianos. Que el interés por tales cosas vaya en aumento es un indicio seguro de malestar social, de que la gente no está a gusto, se siente frustrada y carece de ideales. Estos síntomas son también notorios en occidente, sobre todo en los EE.UU., donde son más crónicos; pero en la Unión Soviética nos hallamos en fase de fiebre aguda.

Aquí hemos de aludir a las responsabilidades de los medios de comunicación. En la U.R.S.S. la *glasnost* ha transformado extraordinariamente el discurso público. La conciencia social ha cambiado por completo de forma. Mas, por desgracia, junto con todos los resultados positivos, se ha dado rienda suelta también a las fuerzas de lo irracional, fuerzas que durante tanto tiempo habían estado contenidas por el poder de la autoridad central y de la censura directa.

¿Es que hemos de publicar todos los disparates que se quiera poner en letras de molde? ¿Cuáles son hoy día las auténticas responsabilidades de los medios en la propagación de lo anticientífico y lo irracional? ¿Debemos invitar al control, o habremos de confiar en un sentido de la decencia que no cohíba al redactor o al editor? En lo que atañe a la violencia declarada y a la pornografía, un reciente decreto de Gorbachov ha ordenado la intervención del ministro de Cultura para reprimirlas. Pero, al parecer, no hay nadie que proteja al público de los fraudes de astrólogos y curanderos. Es interesante advertir que, a la vez que estos embaucadores ven aumentar su fortuna, ha disminuido notoriamente el número de revistas y de programas televisivos dedicados a la divulgación científica. Este lamentable cambio se está extendiendo mucho, y la comunidad científica debería emprender una acción enérgica para contrarrestarlo, aunque no fuera más que para proteger sus propios intereses. Para la Unión Soviética, la actitud de la sociedad respecto a la ciencia y la técnica constituye la clave del desarrollo futuro.

En muchos casos, hay una fuerte correlación entre las tendencias anticientíficas y antitecnológicas y las publicaciones sobre sexo, violencia e ideas sociales extremistas, tales como los más agresivos nacionalismos y fascismos. También están presentes los tradicionales nexos entre el antisemitismo y las tendencias antiintelectuales. Estas conexiones no dejan de señalar un auténtico peligro, una amenaza que va mucho más allá de lo que puedan suponer los irracionales anhelos de un grupo marginal de ufólogos. Lo que se sigue de que tales fuerzas ganen terreno no es sino el extremismo político, que se convierte en amenaza real contra los importantes y bien recibidos cambios que ahora se están produciendo. Otra manera de ver la situación consiste en decir que estamos pasando de creer en una serie de mitos a creer en otros. El "nuevo" conjunto de creencias no tiene nada de nuevo ni de razonable, porque aún estamos bajo el dominio del pensamiento mítico, cuya naturaleza de fase o estadio natural en la historia humana la exploró Claude Lévi-Strauss en sus fecundos estudios.

La regresión a la mitología no señala en modo alguno una nueva "ciencia", una ciencia alternativa como algunos quisieran. Por otro lado, muchas de esas modernas tendencias procuran llamarse a sí mismas científicas, se trate de 'Cienciología' o de astrología. Dicen algunos que la ciencia moderna es autoritaria, no democrática y distante. La autoridad de la ciencia se basa en el poder del método científico y estriba en la prueba por experimento más bien que en declaraciones de los sabios o en el voto popular.

Hasta qué punto ha decaído la ideología estatal puede ilustrarse bien con el caso de Alexander Spirkin. El fue durante muchos años el principal filósofo de la Academia de Ciencias Soviética, elegido como el único miembro capaz de ocupar la cátedra de materialismo dialéctico. Sobre esa doctrina escribió Spirkin los libros de texto oficiales, reeditados numerosí-

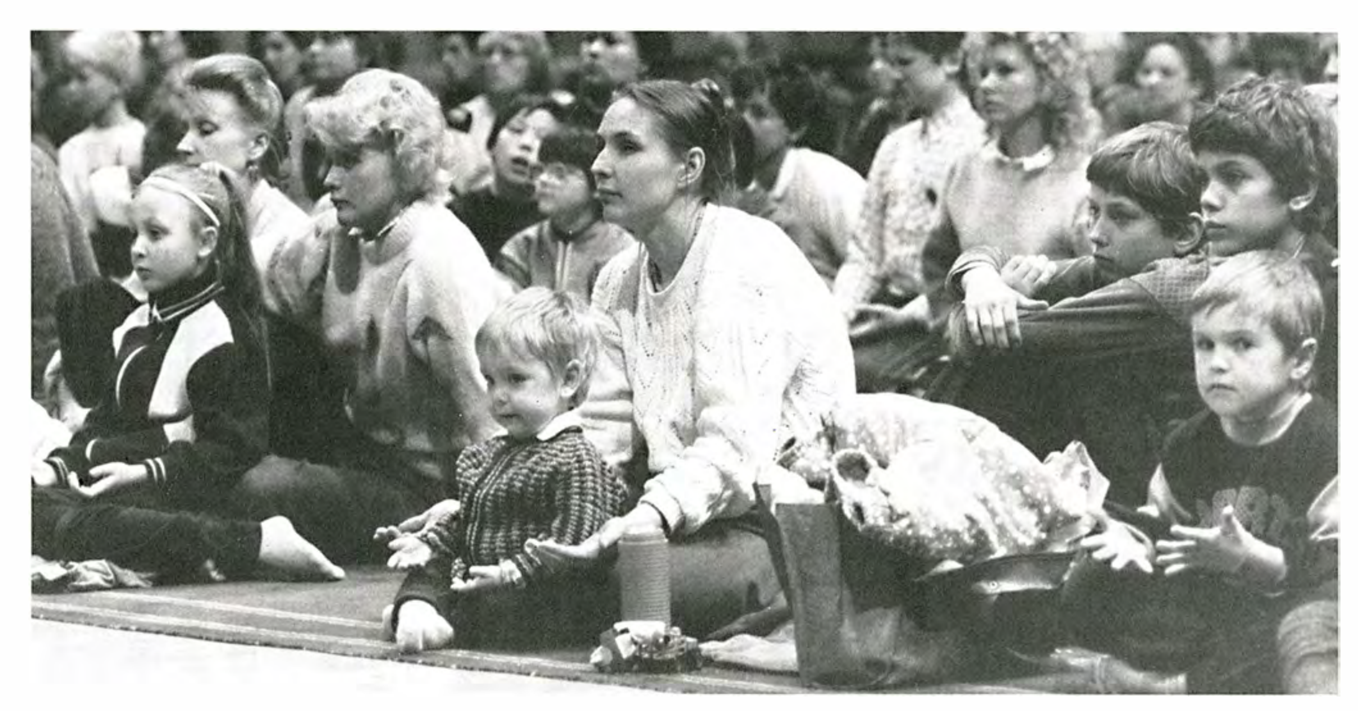
simas veces. Pues bien, a despecho de su profesional adhesión al materialismo dialéctico, Spirkin llegó a ser muy conocido por su sistemática defensa de la percepción extrasensorial (ESP), los doctores brujos, la clarividencia adivinatoria y demás zarandajas pseudocientíficas. Con aparente honradez, sostiene que hay que explorar estas zonas extremas de la experiencia humana y tratarlas no como aberraciones, sino como la realidad más genuina. Ahora bien, ni profesional, ni científicamente está él lo bastante preparado como para enfrentarse a estas cuestiones.

En las elecciones de 1990 para la Academia de Ciencias, el departamento de filosofía y derecho votó a Spirkin miembro académico de número. Los estatutos de la Academia exigen que estas elecciones primarias sean respaldadas por el voto de todos los miembros. Afortunadamente aquí ganó la razón y Spirkin sólo obtuvo 58 de los 240 votos. El académico Ivan Frolof, quizás el único profesional responsable del departamento de filosofía y derecho, adujo razones de incompetencia al explicar tal desbandada de votos. El *affair* Spirkin pone de manifiesto toda la depravación y la desgracia de nuestra institución filosófica. Es muy triste que ni la Academia de Ciencias resulte irreprochable en lo que publica. Recientemente, su oficina editorial, Nauka [Ciencia], difundió un gran número de ejemplares de un libro sobre astrología, y está prometiendo sacar más. Por otro lado, pululan clamorosos escritores que andan buscando ideas y valores nuevos. Aparte de los problemas económicos, esta búsqueda es lo más importante para quienes quieran contribuir de un modo responsable y creativo a afrontar el reto de nuestra situación actual.

Los críticos sucesos que están teniendo lugar se derivan originariamente, hasta cierto punto, de unas concepciones simplistas, incluso mecanicistas, del desarrollo social. Muchas de nuestras ideas sociales están dominadas todavía por el pensamiento positivista, cuyo exponente más destacado quizá sea el marxismo (espero que los lectores excusarán esta supersimplificación). Lo que quiero decir es que los éxitos obtenidos por las ciencias naturales, por la física y la mecánica clásica, en los siglos XVII y XVIII, las pusieron como ejemplo para las ciencias sociales y las teorías políticas. Las ideas, los conceptos y aun los términos de la mecánica dominaron en el vocabulario de gran parte de la teoría social, especialmente en el siglo XIX. Se hablaba, en efecto, de fuerzas sociales, de masas de población, de energía de las naciones, y se describía la historia como un movimiento regido por leyes deterministicas del desarrollo social en un proceso causal. Durante ese siglo aparecieron los fundamentos de los sistemas de muchas partículas y de mecánica estadística, pero, sea por lo que fuere, no influyeron apenas en el pensamiento social. Los economistas prefieren todavía hablar de la balanza de pagos y de las leyes del equilibrio, sin tener en cuenta que el sistema con que nos las hemos de haber es un sistema abierto y no equilibrado, en el que el concepto de entropía es tan importante o más que el de energía.

Con la arrogancia de un científico "de la naturaleza" es fácil ridiculizar a los científicos "no naturales" por su excesiva confianza en el concepto mecanicista de la historia cuando tratan de entender cómo funciona el mundo real. ¿Acaso no estamos viendo que en las ciencias naturales persiste el afán de un enfoque mecanicista en nuestros modelos computarizados, que prometen llegar a mágicos discernimientos en cuanto a predecir y resolver las complejidades del mundo? La computadora es un instrumento extraordinario para el manejo de datos. Pero antes de utilizarlo debemos saber dónde estamos y a dónde queremos ir. Por ahora, las limitaciones de la inteligencia humana parecen ser mayores que lo que pueda esperarse de la ayuda de una inteligencia artificial. Deberíamos tener en cuenta que la teoría social es, intelectualmente, mucho más exigente y compleja que toda nuestra física.

En las actuales instituciones políticas de la Unión Soviética, este legado mecanicista es aún poderoso y domina el debate público y las resoluciones de nuestro recién nacido parlamento. Porque con tal mentalidad es como se crió y fue educada esta generación de



3. SESION DE 'MEDITACION TRANSCENDENTAL' celebrada en Moscú, en la Sala del Club Deportivo del Ejército Central, en octubre de 1990. La masiva asistencia —con la excepción de un joven escéptico *(derecha, al fondo)*— aparece concentrada en atender el adoctrinamiento que le hace un curandero hindú, según la agencia Tass, sobre "autotratamiento, autodominio y autoperfeccionamiento moral".

ОНС

ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И СОВРЕМЕННОСТЬ

ГОЛОС ИЗ КОСМОСА:

«Я не вершитель судеб... Мне неоткуда приходить и некуда уходить. Я вне времени и над пространством..., но я всегда, постоянно в тебе самом, как маленькая частичка огромной мыслящей материи. Ты сумел пробудить меня в себе и теперь я бужу тебя...»

Начиная с № 3 нашего журнала в новой рубрике «Проблемы Высшей Реальности» мы будем публиковать диалоги с космическим Разумом, записанные сотрудниками Всесоюзного научно-координационного и исследовательского уфоцентра Л. Вейнгеровой и Д. Гурьевым.

CIENCIAS SOCIALES Y MODERNIDAD

N.º 1, 1991

VOZ PROCEDENTE DEL ESPACIO:

"No soy ningún ejecutor del destino... No vengo de ningún sitio, ni existe parte alguna hacia la que pueda encaminarme. Estoy más allá del tiempo y del espacio..., pero existo siempre, en toda edad, contigo a modo de partícula minúscula de la inmensa materia pensante. Te esforzaste para que me descubriera a mí mismo y ahora te estoy revelando a ti mismo."

A partir del número 3, nuestra revista publicará, en su nueva sección "Problemas de la Realidad Excelsa", diálogos con la Mente Cósmica, según los vayan recibiendo de L. Veyngerova y D. Gur'ef, del equipo directivo del centro de estudio científico estatal de UFOlogía.

UNA REVISTA CIENTIFICA publicada por la Academia de Ciencias de la U.R.S.S. lleva este mensaje en su contraportada.

legisladores. Uno confía en que la generación siguiente pensará y actuará de modos más humanos... y, así, es esencial indicarle alguna dirección hacia donde ir. Proporcionar esta guía es el cometido que se nos impone a cuantos nos esforzamos en explorar las nuevas y excitantes oportunidades que ahora se brindan. La demanda de ideas nuevas, de nuevos ideales e, inclusive, de una renovada ideología, pese a todas las connotaciones negativas que este último término evoca, pertenece ciertamente al orden del día. No puedo estar de acuerdo con quienes dicen, con Francis Fukuyama, que la historia ha llegado a su fin. Que las viejas ideas hayan seguido su curso no significa que no vayan a seguir circulando, en alas ahora del fundamentalismo de diversas convicciones que está emergiendo y llenando el vacío ideológico. Es este un signo auténtico e importante de que la sociedad se halla en peligro de naufragio.

Una de las urgencias más acuciantes es la de que procuremos fomentar la evolución y no avivar la revolución. Mucho de lo que se espera de una revolución dimana del deseo de un cambio rápido, de que se produzca un milagro que nos libre de todos los males mediante la magia del nuevo credo. En el pasado, la promesa era a menudo religiosa y moral; hoy día el santo y seña han pasado a serlo la ciencia y la razón.

Con frecuencia, esa liberación total y rápida es lo que promete el extremista, el francotirador ideológico, a menudo desesperado e infeliz. El es quien desafía a las leyes de la sociedad y de la ciencia, a la convencional sabiduría del orden establecido. Y, sin embargo, sin tales revolucionarios, sin esos verdaderos abridores de caminos, ningún progreso, aunque vacilante e intermitente, sería posible. De ahí que tengamos que ser tolerantes para con quienes propugnan romper con todo y zambullirse en lo desconocido, y que debamos incluso permitir algo de esta inicial locura e irracionalidad que estamos viendo. Sabemos bien que una sociedad que persigue a todos los disidentes e impone, *manu militari,* la estabilidad está destinada al estancamiento y a la decadencia. ¿Dónde, pues, están los límites? ¿Cuánta disensión se ha de tolerar?

El extremismo político y social es tan intenso, que las débiles fuerzas del orden social resultan a menudo insuficientes para contenerlo. Por esta razón pueden ser tan peligrosos el apoyo político y el de los medios de comunicación a las ideas anticientíficas e irracionales.

Cierto "curador extrasensorial" constituye un caso pertinente. Anatolii Kashpirovskii ha aparecido en numerosas ocasiones en las pantallas de televisión. Durante una hora o más, habla persuadiendo a su audiencia de que sus males dejarán de aquejarles si confían en él. La profesión médica sólo ha hecho oír débiles voces de oposición, que no han logrado contrarrestar la enorme popularidad de Kashpirovskii. En la Noche Vieja de 1991, *Pravda*, el periódico del partido comunista, dedicó media página a hacer una apología de este "doctor". En la misma edición podía leerse un detallado y encomiástico informe sobre un vidente llegado de la India que se ofrecía como asesor en asuntos políticos y privados. Pocos

días después, el mismo periódico respaldaba a una mujer que tiene ideas nuevas sobre la gravedad "rotatoria". En ninguno de estos números del periódico había un solo artículo sobre ciencia y tecnología. Estamos asistiendo también a la aparición de varios movimientos de origen oriental, Krishnaítas y otros.

Como la difusión de semejantes ideas no tiene nada de inofensiva, en 1988 la revista *Priroda* [Naturaleza] publicó una serie de cuatro artículos en los que se estudiaban y comentaban algunos casos de estos y parecidos desarrollos. Esta secuencia de cariz científico y crítico, hecha en una revista fundada por Chekhov, pasó inadvertida, y ahora estamos padeciendo toda una avalancha de mistagogias, ocultismos, esoterismos y pseudociencias. Sólo Vitalii Ginsburg, el famoso físico, ha escrito un buen artículo en *Izvestia* pronunciándose contra estas tendencias. La única conclusión que puede sacarse es la de que están operando poderosas fuerzas irracionales, quizás apoyadas por oscuros motivos políticos.

Aunque sin dejarnos influir, deberíamos recordar que Nancy Reagan consultaba a un astrólogo. Y en la literatura del reciente pasado podemos remontarnos a cómo trató Leon Feuchtwanger el tema del poder y el esoterismo en su libro de 1949 *The Lautensack Brothers*, al describir la vida en el Tercer Reich de Hitler. Para un pasado más remoto tenemos los célebres capítulos de la *Historia de la Decadencia y Ruina del Imperio Romano* en que hizo Gibbon una descripción ya clásica de los síntomas que indican el hundimiento de una sociedad y los cultos emergentes.

Cabe concluir que las crisis de la razón y de la racionalidad son un capítulo de la antropología social y deben tratarse, como tema de estudio, como un *petit mal* de una sociedad, antes que cualquier otro. En cuyo caso, el despego profesional del médico o del historiador es más apropiado que la actitud del científico o del periodista comprometidos personalmente en este extraño debate.

Pero la exacerbante crisis de la racionalidad que estamos padeciendo en la Unión Soviética no es otra cosa que el talante antitecnológico provocado por los efectos del desastre de Chernobil. Este accidente, el más grave de la historia de la energía nuclear, se ha divulgado mucho. Sólo indicaré que, como sociedad, la Unión Soviética no estaba preparada técnica ni psicológicamente, tal vez tampoco intelectualmente, para afrontar las realidades de la era atómica. Son tan descomunales las fuerzas de que dispone la tecnología nuclear que han de puntualizarse muy bien las correspondientes responsabilidades sociales y garantías legislativas. Esta es la principal y muy penosa lección que Chernobil nos enseña, lo que convierte tan triste caso en algo más que un mero accidente técnico.



4. "UN CIENTIFICO DESCUBRE UAF BIOLOGICA" se lee al pie de esta fotografía proporcionada por la Agencia Tass. El científico en cuestión, natural de China, aparece sentado en el interior de la "pláncha electromagnético-biológica" de ultra-alta-frecuencia, que él mismo se ha construido en el sótano de su apartamento.

Vemos ahora la general reacción a este desastre. Las consecuencias más graves de lo de Chernobil son los daños directos e indirectos a la salud pública y al bienestar de las personas. Los médicos no están seguros de qué causa más sufrimiento y desdicha, si la radiación o el miedo a ella. También hemos de registrar la pérdida de confianza pública en la ciencia, en los científicos y hasta en la profesión médica. Se hizo mucho por minimizar la magnitud de lo ocurrido y aun por engañar al público sobre las auténticas consecuencias: el advenimiento de la *glasnost* en los asuntos nucleares ha sido lento y penoso. ¿Podemos reprocharle a la gente su generalizado resentimiento contra la energía nuclear? Y, sin embargo, este resentimiento ha hecho parar todas las nuevas centrales nucleares.

La protesta, y hasta revuelta, contra la realización de pruebas atómicas en el Kazajstán es significativa. Ha llegado a convertirse en grave problema de orden público que hace prácticamente imposible llevar adelante las pruebas en esa república infestada de centros nucleares. Las condiciones en las tierras boreales de Novaya Zemlya no son mucho mejores para los fabricantes de bombas atómicas.

En cierto sentido, tales reacciones contra las pruebas atómicas son saludables. El cuestionamiento de las pruebas es, en conjunto, el resultado de la monstruosísima e irracional acumulación de armamento nuclear a consecuencia de la carrera armamentística. Es algo que de suyo había de seguirse y con unos alcances que trascienden mucho estas protestas locales. Puede, incluso, decirse que la carrera de armamentos es una demostración de que el mundo entero abrigaba la esperanza mecanicista en un arreglo tecnológico de los problemas sociales. A este respecto ha sido demasiado elevado el coste que han tenido que pagar todas las partes interesadas para llegar a convencerse de la futilidad de la fuerza.

En la Unión Soviética los movimientos declarados contra la tecnología no se limitan a oponerse a la nuclear. En Moscú, las protestas han detenido la construcción de una gran central alimentada con gas natural. Las consecuencias pueden ser graves y los retrasos y pérdidas que tales decisiones implican, inmensos.

Las exigencias del creciente movimiento ecologista han hecho que se cierren muchas industrias metalúrgicas, químicas y bioquímicas. La consecuencia de ello puede ser atrasos en el desarrollo industrial a largo plazo. El primer ministro lo ha advertido con toda crudeza. Yo no estoy seguro de quién tenga razón, si el gobierno tecnocráticamente mentalizado, que de facto no ha reconocido los peligros ambientales, o los ecologistas, que andan desorientados respecto a cómo afrontar las presiones del mundo in-



5. CENTRO DE MEDICINA POPULAR abierto recientemente en un hospital de Moscú. La Agencia Tass informa que "ahora, por fin, especialistas en ...medicina no convencional pueden practicar pública y legalmente sus tratamientos", y son millares los enfermos que aguardan su turno en las listas del centro. Entre los financiadores del mismo figura el Departamento Municipal de la Salud.

dustrializado. El resultado podría ser un general descenso del nivel de vida.

Donde mejor se ve la pugna entre lo racional que ha podido llegar a equivocarse y lo irracional que en parte tiene razón pero básicamente yerra, es en el terreno de la ciencia. Hace algunos años se me ocurrió concertar un diálogo entre un astrónomo y un astrólogo. El astrónomo era la máxima autoridad en física solar. Para él, el enigma que más importaba resolver era el de la discrepancia entre la cantidad de neutrinos medida procedentes del Sol y el flujo de energía observado. En otras palabras, no sabía a ciencia cierta por qué brilla el Sol. Este experto pero dubitante científico habría llevado ciertamente las de perder en un debate con un astuto astrólogo, cuyos poderes de persuasión son su principal fuente de vida, como lo han sido los de todos los miembros de tan antigua profesión. Recordemos el clásico debate entre el obispo Samuel Wilberforce y Thomas Henry Huxley. Este gran defensor de la evolución ganó más adeptos con su famoso comentario, en que vinculó su origen al de un simio, que no con razonamientos científicos. El debate público es un poderoso instrumento didáctico en materias de ciencia, pero la discusión científica profesional suele hacerse, más bien, con poca publicidad y siguiendo los procedimientos científicos establecidos. El caso de la fusión fría demuestra lo que puede ocurrir cuando no se respeta este método.

Carl Sagan, de la Universidad de Cornell, me comentaba que en los EE.UU. hay 15.000 astrólogos y sólo 1500 astrónomos. Por otra parte, Kepler, astrónomo eminentísimo donde los hubiera, fue también astrólogo practicante y escribió tres horóscopos para sí mismo. En uno de ellos apunta Kepler que él había sido concebido el 16 de mayo de 1571, a las 4:37 a.m. y que nació el 27 de diciembre a las 2:30 p.m., tras 224 días, 9 horas y 53 minutos de gestación. Y en nuestros días el muy popular y progresista periódico *Jóvenes Comunistas de Moscú* da, en su diario horóscopo, avisos detallados sobre las horas más convenientes para las actividades sexuales. ¡Al fin y al cabo, la astrología resulta ser una ciencia a la vez exacta y práctica!

Habría que advertir que con el retorno de la religión tradicional como portadora de normas morales aún no hemos creado el suficiente contrapeso racional que contrarreste el influjo de esos acuciantes problemas que laten como rescoldos entre las cenizas de la totalitaria ideología estatal. Es alucinante que en la Unión Soviética estemos importando creacionismo de los fundamentalistas que hay en los EE.UU. Tras décadas de indoctrinación darwiniana, nosotros tenemos nuestros propios creacionistas de convicción más religiosa que lysenkoista.

El interés por profundizar en lo desconocido, ya se trate de nuestro futuro personal o del comportamiento de planetas remotos, ha llevado a la humanidad a miríadas de descubrimientos científicos. ¿Podemos hallar realmente censurable que esas tendencias tan propias del ser humano se desvíen en ocasiones y casi nunca sean tan rectas ni tan lógicas como pueden parecérselo después a la mente racional?

Más que en cualquier otra época, deberíamos hoy preocuparnos por propagar el mensaje de la ciencia y por desarrollar en la sociedad buenas disposiciones respecto a los asuntos científicos. Y, sin embargo, nos es imposible combatir de un modo directo contra las tendencias anticientíficas. Porque son síntomas de una enfermedad cuyas causas laten a niveles más hondos y los desarreglos sociales no son materia sencilla de tratar. Un esfuerzo sostenido y sistemático en propagar la ciencia como parte de la cultura moderna es de importancia crítica para el futuro, para las generaciones por venir, más que para las actuales.

Al irse manifestando los síntomas de la crisis, así en el arte como en otras expresiones de la mentalidad pública, debemos preguntarnos siempre hasta qué punto refleja esos síntomas un fenómeno social y a quién y en qué medida responsabilizaremos de la propagación de esos efectos. Fundamentalmente esto es lo que determina la responsabilidad de quienes controlan los medios de comunicación y, con ello, al artista o al escritor cuya influencia puede difundirse. En otras palabras, ¿deberíais parar a Hitler impidiendo la publicación de *Mi lucha*? ¿Podríais?

No pretendo ofrecer con esto una solución a tamaños problemas. Pero uno no puede menos de pensar en tales términos, especialmente en un período de cambios críticos y turbulentos, cuando causas y consecuencias están tan enmarañadas.

Lo que debe interesarnos profundamente son los límites a que pueda llegar esta tendencia. Hace poco, en virtud de la recesión de la ideología

soviética oficial, ha habido intentos de introducir las humanidades en los planes de estudio de nuestras universidades científicas y técnicas. En el Instituto de Física y Tecnología de Moscú, a iniciativa de su rector Nikolai V. Karlov, se ha hecho un esfuerzo sistemático por ofertar conferencias y cursos enteros sobre la historia de la cultura, sobre religión, sobre arte y sobre historia de la ciencia y de la civilización. Algunos críticos preguntan en qué contribuyen esas enseñanzas a la instrucción de los alumnos. La respuesta es que lo que de veras importa es la educación. Por desgracia, la importancia de la educación no es apreciada debidamente y esta falta de aprecio es lo que condujo, en definitiva, al desastre de Chernobil.

Los trascendentales cambios que se están produciendo en la Unión Soviética explican también este general auge de lo irracional. Lo más grave de él es el creciente extremismo que parece indicar. Aquí está su auténtico peligro, según lo ha señalado uno de nuestros sociólogos más observadores. Desafortunadamente, en el pasado muchos intelectuales han sostenido que, así como en arte y en ciencia, también en la vida pública puede estar bien lo extremado. Pero, dadas la importancia y la responsabilidad de la ciencia y la tecnología modernas, ya vemos que tan simplista actitud no basta para resolver las complicadas cuestiones que se plantean. Básicamente, hemos de habérnoslas de nuevo con la fundamental disparidad entre nuestra experiencia cultural y nuestra civilización tecnológica, o, lo que viene a ser lo mismo, entre el ser y el tener. Un antiguo dilema de la condición humana se nos está volviendo a presentar ahora de un modo nuevo y menos conocido.

Solamente puedo confiar en que la buena voluntad prevalezca. Es tan enorme el precio que en el pasado ha tenido que pagar la Unión Soviética por atender a las demandas de una racionalidad vulgar e igualitaria, que bien podemos hoy comprender, si no excusar, el actual estallido de irracionalidades.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ESCAPE FROM FREEDOM. Erich Fromm. Avon Books, 1982.

PLUTO'S REPUBLIC: INCORPORATING "THE ART OF THE SOLUBLE" AND "INDUCTION AND INTUITION IN SCIENTIFIC THOUGHT". Peter Medawar. Oxford University Press, 1982.

MYTH AND MEANING. Claude Lévi-Strauss. Schocken Books, 1987.

VEKHY. Novosti, Moscú, 1991. (En ruso.)

Colisiones entre galaxias

Los choques violentos entre galaxias no constituyen ningún fenómeno insólito en el cosmos. De tales colisiones podrían nacer galaxias elípticas; así lo sugieren los modelos informáticos y las observaciones astronómicas

Joshua Barnes, Lars Hernquist y François Schweizer

Las galaxias, como las personas, prefieren no estar solas y tienden a reunirse en parejas, en pequeños grupos e incluso en grandes acumulaciones. La Vía Láctea, por ejemplo, pertenece al Grupo Local, junto con la notoria Galaxia de Andrómeda y un par de docenas de compañeras menores. En la mayoría de tales agregados, median grandes distancias de una galaxia a otra, que podemos cifrar entre 10 y 100 veces su propio diámetro; bajo la influencia de la gravedad, se mueven a razón de un diámetro galáctico cada pocos cientos de millones de años. Durante la vida del universo —10.000 a 20.000 millones de años, según la estimación común— son inevitables, pues, algunos choques galácticos.

Aunque hace un decenio muchos astrónomos tenían serias dudas sobre la frecuencia e importancia de los choques galácticos, nuevas observaciones, combinadas con avances teóricos y modelos informáticos refinados, han demostrado que deben ser mucho más corrientes de lo que antes se creía. Cada vez hay más datos indicadores de que las galaxias que chocan suelen fusionarse y formar una nueva clase de objeto. Aumenta la convicción de que tales choques controlan la evolución de muchas galaxias y conducen a la formación de diversos entes peculiares, entre los que pudieran estar incluidos los cuásares, distantes y extraordinariamente luminosos.

JOSHUA BARNES, LARS HERNQUIST y FRANÇOIS SCHWEIZER comparten una misma fascinación por la interacción galáctica. Barnes obtuvo en 1984 el doctorado en astronomía por la Universidad de California en Berkeley. Recientemente ingresó en el Instituto de Astrofísica de Honolulú, Hawai, como astrónomo asociado. Hernquist recibió su doctorado en física en el Instituto de Tecnología de California en 1985. Es catedrático de astronomía en el Observatorio Lick de la Universidad de California en Santa Cruz. Schweizer se doctoró en astronomía en Berkeley en 1975, trabajando luego, durante más de diez años, en el departamento de magnetismo terrestre de la Institución Carnegie de Washington, D.C.

Las interacciones entre galaxias no se parecen en nada a las que ocurren con los objetos ordinarios. Las distancias entre las estrellas de una galaxia son tales, que hasta en el más violento de los encuentros galácticos apenas se producen colisiones estelares. En algunos cúmulos, los pares de galaxias se aproximan a velocidades muy grandes —miles de kilómetros por segundo— y, sin embargo, pasan directamente una a través de la otra sin sufrir daños reseñables.

No deja de ser sorprendente que, si esas mismas galaxias se acercaran a sólo cientos de kilómetros por segundo, una disgregaría la otra, fundiéndose con toda probabilidad en escasos centenares de millones de años. Tal comportamiento, paradójico a primera vista, refleja un fenómeno: las interacciones galácticas están regidas por las fuerzas gravitatorias. Cuanto más lento sea un encuentro entre galaxias, tanto más tiempo tiene la gravedad para producir grandes y destructoras mareas y tanto mayor el daño resultante.

La subida y bajada del nivel del océano dos veces al día ilustra la naturaleza de las fuerzas de marea. Las mareas oceánicas débense a que la cara de la Tierra más próxima a la Luna experimenta una atracción gravitatoria más intensa que el conjunto del planeta, mientras que la sufrida por la cara opuesta es más débil. En virtud de ello, las aguas de la cara próxima se ven atraídas hacia la Luna y las de la cara opuesta se alejan del satélite; ésta es la razón de que haya dos mareas diarias. Del mismo modo, una galaxia que se encuentre en el campo gravitatorio de una compañera cercana desarrolla protuberancias en sus extremos próximo y distal.

Las mareas entre las galaxias son mucho más perturbadoras que las de los océanos terrestres, porque las primeras pasan mucho más cerca una de otra, en relación con su tamaño, de lo que lo hacen la Tierra y la Luna. Si ésta describiera una órbita en torno al planeta a la mitad de su distancia actual, la fuerza gravitatoria que ejerce se multiplicaría por cuatro, porque la gravedad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Pero la *diferencia* de fuerzas entre la cara próxima y la lejana de la Tierra, que es lo que determina la altura de la marea, se multiplicaría por ocho. En otras palabras, las fuerzas de marea son inversamente proporcionales al cubo de la distancia. En encuentros próximos, las fuerzas de marea entre un par de galaxias pueden llegar a destrozar las dos.

Desde los años cincuenta se conoce la existencia de ciertas galaxias curiosas, rodeadas por puentes y colas, configuraciones alargadas a las que, durante mucho tiempo, se consideró aberrantes. La mayoría de los astrónomos rechazaba que los choques galácticos constituyeran un fenómeno corriente, opinión que comienza a cambiar con la mejora de las observaciones y un conocimiento más completo de su dinámica, entre otros progresos.

En 1983, el *Satélite Astronómico de Infrarrojos* (*IRAS*) proporcionó pruebas sorprendentes de los efectos generalizados de las colisiones galácticas. Mientras observaba el cielo a longitudes de onda entre 25 y 100 micrometros (típicas de la radiación infrarroja emitida por los gases calientes y las nubes de polvo), el *IRAS* descubrió montones de galaxias que brillan en el infrarrojo mucho más que en las longitudes de onda visibles.

Estas galaxias parecen atravesar intensos episodios de formación de es-

trellas, que liberan cantidades ingentes de energía infrarroja. Son los choques o las fusiones intergalácticas lo que verosímilmente provoca la brusca erupción de nacimientos estelares. De hecho, muchos objetos cuya identificación se debió a su conspicuo brillo infrarrojo en los mapas de baja resolución del *IRAS* parecen ser, al examinarlos con más detalle, galaxias en interacción.

Observaciones cada vez más afinadas realizadas en longitudes de onda visibles han puesto de manifiesto que incluso algunas galaxias elípticas, aparentemente tranquilas y sin irregularidades, muestran signos de fusiones previas. En 1979, mientras ponía a punto técnicas de realce de imágenes en placas fotográficas, David F. Malin, del Observatorio Anglo-Australiano de Nueva Gales del Sur, halló unas capas de materia luminosa, gigantescas y tenues, que ceñían galaxias elípticas; eran éstas, en todo lo demás, normales.

El descubrimiento dejó atónitos a muchos astrónomos. Las galaxias elípticas eran conocidas por sus distribuciones regulares de luz. Además, los grandes movimientos aleatorios de las estrellas en el interior de dichas galaxias deberían difuminar cualquier incipiente agrupamiento u organización en aproximadamente la centésima parte de la edad de estas últimas. Hasta entonces sólo se habían observado formaciones con aspecto de capas alrededor de una clase limitada de supuestos residuos de una fusión.

Inmediatamente se propusieron varios mecanismos para explicar la presencia de las capas; entre otros: ondas de choque creadas por un viento galáctico, enormes explosiones galácticas y deposición de estrellas en el curso de fusiones galácticas. Sólo la última hipótesis ha superado la prueba del tiempo. Sin duda, los choques y las explosiones originarían la creación de capas de gas y estrellas jóvenes y calientes, pero el color y las características espectrales de las capas indican que sus componentes son, sobre todo, estrellas de cierta edad, de hasta diez mil millones de años, muy parecidas a las que se encuentran en los discos de las galaxias espirales.

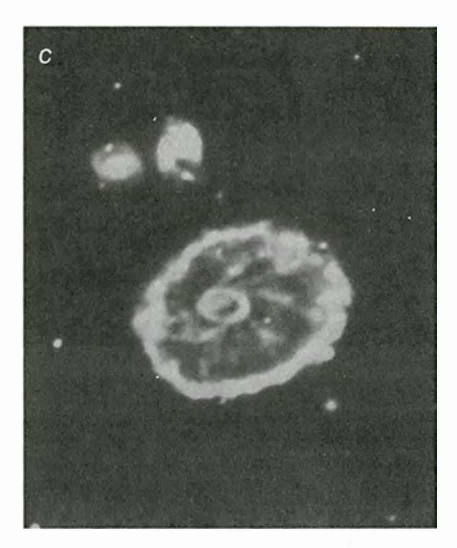
Los nítidos bordes de las capas indican que sus estrellas constituyentes no participan de los grandes movimientos aleatorios del interior de las galaxias elípticas. Deben, por tanto, haberse originado en galaxias cuyas velocidades aleatorias internas fuesen



1. LOS GRUPOS COMPACTOS de galaxias gravitatoriamente ligadas entre sí pueden experimentar interacciones a gran escala. El modelo informático que aquí se muestra comenzó con seis galaxias independientes. Avanzada la simulación, se nos ofrece la disgregación mutua de dos pares de galaxias de disco, emitiendo largas colas de gas y estrellas. Con el tiempo, las seis galaxias se fundirán en un solo objeto. Tales interacciones de grupo podrían constituir uno de los mecanismos en cuya virtud se formen las grandes galaxias elípticas.







2. DE LOS CHOQUES GALACTICOS surgen complejas estructuras. La forma espiral de la Galaxia del Remolino, M51, fue el resultado del paso cercano de su pequeña galaxia compañera (*a*). En el sistema NGC 3808, las estrellas, el gas y el polvo están pasando de la galaxia espiral grande a su compañera (*b*). En la Galaxia de la Rueda se formaron dos anillos de estrellas después de que una de sus compañeras atravesara el disco prin-

pequeñas. Sólo los modelos que incluyan estrellas capturadas de galaxias bien ordenadas parecen capacitados para justificar las llamativas configuraciones geométricas que rodean a otras, como la Arp 230 y la NGC 3923.

La investigación de las galaxias elípticas ha revelado también indicios adicionales de fusiones recientes. En algunas de ellas, por ejemplo, la región central gira en una dirección, mientras que las partes más externas lo hacen en sentido contrario. Tal contrarrotación sería difícil de explicar si se hubieran formado todas de una pieza, pero resultaría muy natural en un contexto de fusión. A mayor abundamiento, uno de los primeros casos observados de galaxia contrarotatoria fue el resto de fusión NGC 7252.

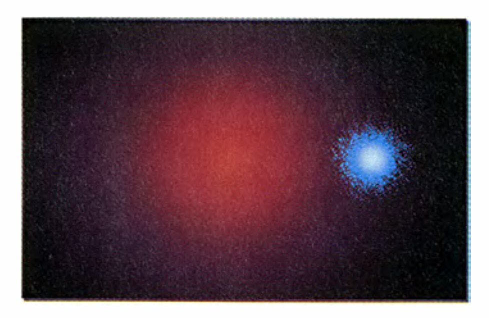
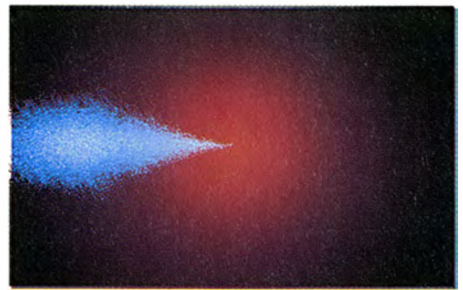
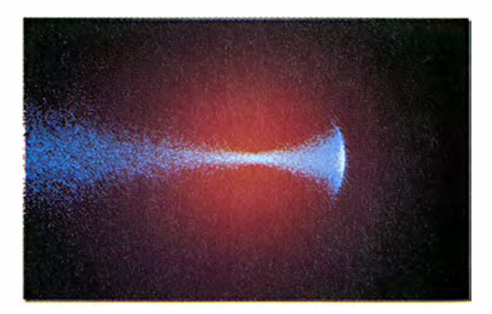
La visibilidad de las capas debería persistir algunos miles de millones de años, lo que las convertiría en indicios de fusión más duraderos que las irregularidades instadas por las mareas, aunque éstas sean más conspicuas. Nosotros hemos hallado capas tenues que ciñen a casi la mitad de todas las elípticas observadas hasta la fecha e incluso a ciertas galaxias de disco que muestran un prominente abultamiento central. Tal abundancia sugiere que los choques entre galaxias deben ser bastante comunes.

La mejor comprensión adquirida de la estructura galáctica refuerza ese criterio. Se ha descubierto que la dinámica de las galaxias no sólo está determinada por las estrellas luminosas y las nubes de gas, visibles ambas, sino también por los invisibles halos de materia "oscura" que parecen representar la fracción mayor de su masa total. Al ser invisible, sus efectos gravitatorios nos revelan su presencia.

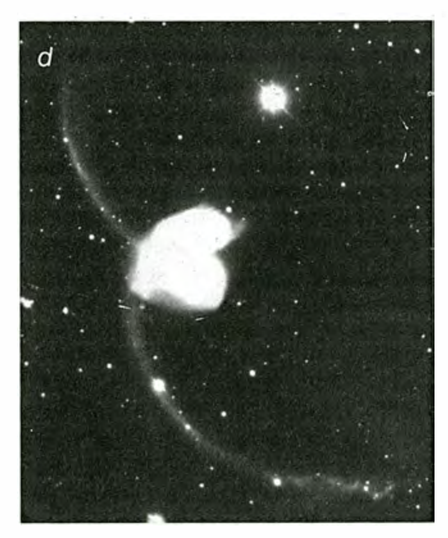
Si no dejamos de lado la materia oscura, podría resultar que la extensión y la masa de las galaxias decuplicaran los valores aparentes, con lo que crece mucho la probabilidad de encuentros. Además, durante una pasada rasante, la materia del halo oscuro transporta grandes cantidades de momento cinético, facilitando que una galaxia caiga en el seno de otra y se suelden.

Conforme se iban acumulando los datos empíricos que abonaban el carácter corriente de las colisiones galácticas, los modelos informáticos ayudaban a esclarecer qué sucedía en tales encuentros. Los primitivos modelos desarrollados a principios del decenio de 1970 por Alar Toomre, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Juri Toomre, entonces en la Universidad de Nueva York, mostraron que, cuando un delgado disco giratorio de estrellas se ve sometido a mareas causadas por una compañera cercana, se crean espontáneamente largas estructuras filamentosas. Las fuerzas de marea atraen las estrellas de la parte cercana del disco dándoles forma de puente (que, pese a su nombre, rara vez enlaza con la otra galaxia), mientras que las estrellas del lado opuesto se separan y originan una cola extensa.

Depende del tipo de galaxia y de la forma geométrica del sistema que los choques produzcan también brazos espirales, masas de restos en órbita perpendicular al plano de la galaxia, anillos estelares y gaseosos y toda clase de filamentos y apéndices lumino-

3. CAPAS ORDENADAS DE ESTRELLAS alrededor de las galaxias elípticas; podrían deberse a los choques. En esta secuencia de una simulación por ordenador, una galaxia pequeña e inicialmente esférica (*azul*) resulta perturbada por el campo gravitatorio de una gran galaxia elíptica (*región*







cipal (*c*). Los choques entre galaxias de masas parejas tienden a la destrucción estructural mutua. Las Antenas (*d*) constan de dos galaxias de disco cuya interacción gravitatoria ha hecho crecer dos colas. En la NGC 520, las dos galaxias que chocan se presentan entrelazadas (*e*). Tal colisión termina produciendo una sola masa galáctica de aspecto desordenado, como NGC 7252 (*f*), que puede estabilizarse en galaxia elíptica.

sos. Particularmente misteriosas resultan algunas galaxias que muestran huellas gravitatorias delatoras de dos compañeras en colisión, no obstante la presencia de un solo cuerpo de estrellas, desordenado además.

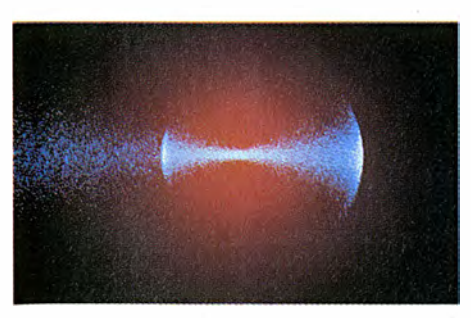
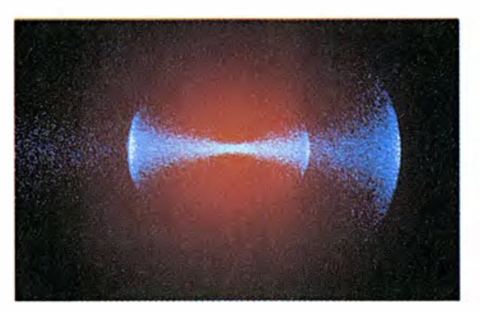
La comprensión del origen y destino de las galaxias en interacción requiere modelos mucho más elaborados que los diseñados en un comienzo por los Toomre. Para las ilustraciones del presente artículo, cada galaxia consta de 44.000 puntos másicos, representando unos la materia oscura y otros las estrellas o el gas. El ordenador calcula el movimiento de cada punto másico bajo la influencia combinada de los campos gravitatorios de todos los demás. Tan refinadas simulaciones requieren los eficaces programas y los potentes superordenadores de que hoy día se dispone.

Uno de los resultados más importantes de nuestros nuevos modelos es que las galaxias en interacción tienen una gran tendencia a soldarse. Simulamos, a este respecto, dos galaxias que se aproximaban entre sí a velocidades adquiridas en la caída de una hacia la otra desde gran distancia. El sentido común llevaría a pensar que, a tales velocidades y tras su encuentro, los objetos deberían terminar separados por aproximadamente la misma distancia. Pero lo que realmente sucede es muy diferente. Las galaxias quedan aprisionadas en órbitas muy próximas una alrededor de la otra, chocan una segunda vez y después se sueldan, proceso que dura varios centenares de millones de años.

Las consideraciones teóricas habían anticipado que los efectos de marea producirían contracción de las órbitas, porque cada galaxia resulta atraída hacia las perturbaciones de marea que induce en su compañera. Pero pocos astrónomos habían apreciado la magnitud de la contracción orbital desarrollada en los encuentros galácticos típicos, ya que su tasa se debe en buena medida a la interacción gravitatoria entre los extensos halos de materia oscura que rodean a las galaxias.

A comienzos de los años ochenta, los modelos informáticos desarrollados por Peter J. Quinn, de la Universidad Nacional Australiana, confirmaron que las capas que se ven alrededor de algunas galaxias podrían ser la consecuencia de fusiones. También mostraron que las fuerzas de marea deforman y llegan a destruir las galaxias compañeras que chocan con sus vecinas mayores. A causa de la pérdida de energía orbital, muchos de los restos quedarán capturados en órbitas muy cercanas alrededor de la galaxia de mayor masa. Si se supone que los movimientos aleatorios internos de la compañera ya fuesen inicialmente pequeños, los residuos retendrán gran parte de su ordenación original durante algún tiempo. De esta manera, las estrellas capturadas por la galaxia de mayor masa pueden formar macroestructuras ordenadas.

Si la compañera que se precipita es un disco aplanado, el campo gravitatorio de la galaxia de mayor masa tiende a doblarlo y plegarlo en forma de superficie curvada. Vistos desde la Tierra, sus bordes parecen gruesos y, por tanto, brillantes. Cada vez que la compañera se arrolla en torno a la galaxia primaria, produce otra región delgada y curvada de estrellas y una nueva capa asociada.

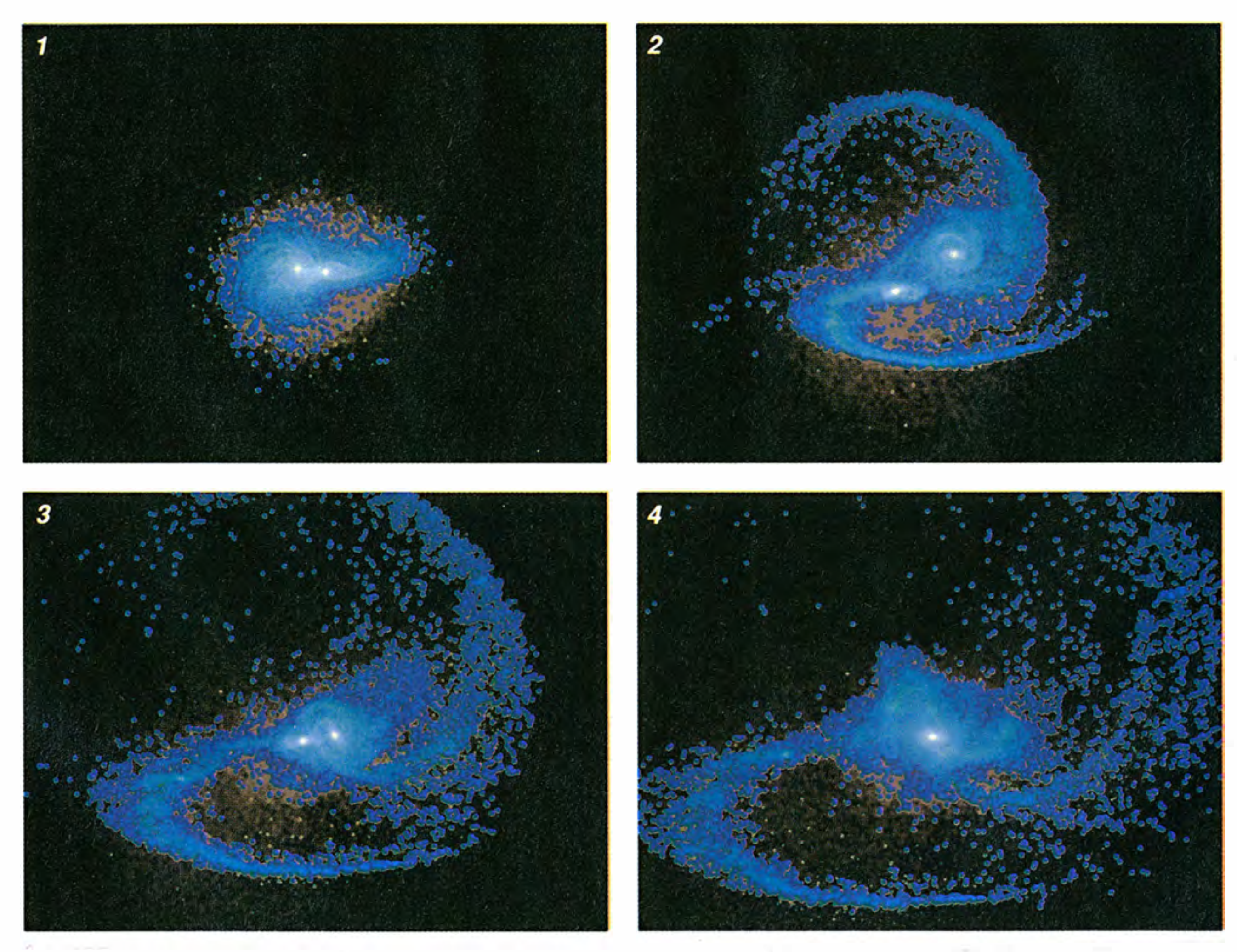

***roja*). Las estrellas de la galaxia pequeña crean capas que se van haciendo cada vez más débiles, pero más numerosas, conforme pasa el tiempo. Alrededor de muchas galaxias elípticas reales se observan capas parecidas, así la NGC 474, que aquí se muestra en falso color (*última de la derecha*).**

Por supuesto, ninguna galaxia real es uniformemente delgada. Los modelos enseñan que los pequeños movimientos aleatorios responsables del espesor de las galaxias espirales reales pueden difuminar algo las capas, aunque mantengan su morfología esencial. Los propios restos de pequeñas galaxias esféricas pueden formar capas en nuestras simulaciones, como lo hacen las fusiones de compañeras del mismo tamaño. El grado de borrosidad depende de la estructura de la galaxia víctima, menor, y así podemos utilizar, en principio, las observaciones de las capas para acotar las propiedades de las galaxias originarias. La diversidad de capas generadas por los modelos informáticos parece suficiente para explicar las realmente observadas alrededor de las galaxias elípticas.

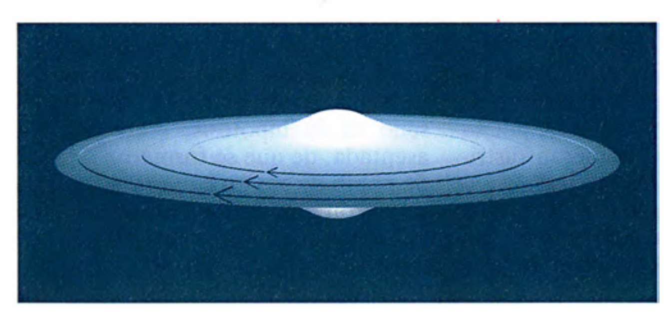
La modelación ha proporcionado también ideas sobre la naturaleza de las galaxias "de estallido de estrellas", clase extraña identificada inicialmente por sus colores característicos. En 1978, Richard B. Larson y Beatrice M. Tinsley, de la Universidad de Yale, pusieron de manifiesto que las galaxias en interacción tendían a ser más azules que el promedio (los colores son en realidad muy suaves); debían ese azulado a la presencia de múltiples estrellas recientes. Larson y Tinsley llegaron a la conclusión de que las galaxias en interacción experimentan estallidos de formación de estrellas que duran hasta 100 millones de años, es decir, alrededor del uno por ciento de la edad de una galaxia típica. A medida que los sistemas en interacción envejecen, sus colores parecen palidecer gradualmente hasta volver a lo normal.

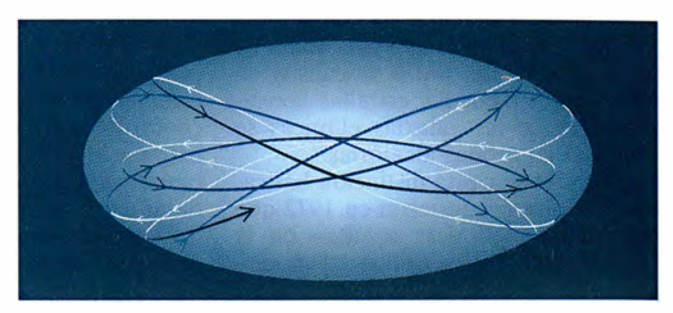
Las estrellas se forman en el interior de enormes nubes de polvo y gas, que absorben gran parte de la luz emitida por las brillantes estrellas jóvenes y reemiten la energía en forma de radiación infrarroja de mayor longitud de onda. Observaciones en las longitudes de onda del infrarrojo podrían revelar así lugares de formación de estrellas que de otra manera quedarían ocultos. A pesar de ello, resultó una sorpresa que el *IRAS* pusiese de manifiesto una clase de galaxias que emiten hasta el 99 por ciento de su energía en el infrarrojo. Las fotografías ópticas descubrieron que muchas de ellas son sistemas en interacción, rodeados de colas y puentes construidos por la fuerza de la atracción de compañeras próximas; otras parecen ser verdaderas fusiones galácticas.

La cuantía ingente de radiación infrarroja emitida por tales galaxias nos habla de una tasa prodigiosa de nacimiento estelar, de cientos de estrellas al año en algunas de ellas, por dos o tres anuales en la Vía Láctea. La región más activa suele localizarse en la parte central de la galaxia, cuyo diámetro no llega por lo común a la décima parte del total. Los radiotelescopios que operan en longitudes de onda milimétricas han detectado vastas nubes de gas en el centro de muchas galaxias infrarrojas. Estas nubes



4. ESTE ENCUENTRO entre dos galaxias espirales de disco es una simulación de ordenador, realizada en el Centro de Supercomputación de Pittsburgh; nos quiere ilustrar de qué modo las fuerzas gravitatorias transforman las galaxias. Conforme se van acercando, las mareas gravitatorias crean largos puentes y colas. Tras una segunda pasada, las galaxias comienzan a entremezclarse. Cada disco galáctico (*azul verdoso*) está rodeado de un gran halo de materia oscura (*rojo*) que desempeña un importante papel en su interacción gravitatoria.





5. GALAXIAS ESPIRALES Y ELIPTICAS se caracterizan por una estructura dispar. En las de disco, las estrellas se mueven alrededor de un centro común en órbitas aproximadamente circulares que descansan casi en el mismo plano (*a la izquierda*). En las galaxias elípticas no hay estructura aplanada y buena parte de las estrellas va y viene a lo largo del eje mayor de la galaxia (*a la derecha*).

tienen masa suficiente para alimentar durante varios cientos de millones de años la rápida formación de estrellas observada.

Era lógico que los astrónomos que estudiaban las galaxias de estallido de estrellas se preguntasen de dónde provenían las nubes centrales de gas. Se trata de cantidades de gas comparables con las que se encuentran en las galaxias espirales típicas. Pero comprimir todo el gas de una galaxia en una pequeña región central plantea un difícil problema. La conservación del momento cinético obliga a una nube gaseosa a girar más deprisa a medida que se contrae. Cuanto más rápida sea la rotación, tanto mayor será la aceleración centrífuga que impide que el gas caiga hacia el centro. Así, por ejemplo, el gas distribuido por toda la Vía Láctea ya gira con velocidad suficiente para compensar la fuerza gravitatoria que lo atrae hacia el centro; no podría acumularse allí a menos que algún tipo de freno retardase su movimiento.

Los modelos informáticos resolvieron este rompecabezas al revelar que, durante las interacciones galácticas, puede producirse el frenado necesario. Conforme las fuerzas de marea deforman un disco galáctico, las estrellas y el gas dejan de moverse al unísono. En la galaxia afectada, los chorros de estrellas se interpenetran libremente entre sí, pero las corrientes de gas interactúan enérgicamente y crean una configuración espiral de intensas ondas de choque. La fuerza gravitatoria de las estrellas tiende a extraer momento cinético de las nubes de gas sometidas a las ondas de choque, obligándolas a contraerse.

Más tarde, cuando las dos galaxias comienzan a fundirse, el gas que queda en los discos puede chocar a velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo, estableciendo enormes frentes de choque. Es indudable que algunas estrellas se generan directamente del gas así comprimido. Pero la mayor parte de él, reunida ya en el centro de cada galaxia, se dirige hacia el centro de la pareja recién fundida, donde puede alimentar un estallido de formación de estrellas mucho mayor.

Las observaciones de las galaxias más brillantes en el infrarrojo sugieren que la radiación no sólo proviene de las regiones de formación de estrellas, sino también de un núcleo central compacto, puede que alimentado por materia que está cayendo al interior de un agujero negro de gran masa. Se cree que los agujeros negros cuyas masas multiplican mil millones de veces la solar constituyen las maquinarias centrales de los cuásares, objetos que se encuentran entre los más distantes y luminosos del universo.

Cuando está aislado, el agujero negro no ofrece ninguna indicación visible de su presencia. Pero la materia que llega a sus proximidades terminará describiendo espirales centradas en él, se calentará enormemente y emitirá poderosas radiaciones antes de desaparecer para siempre. Las nubes centrales de gas creadas en las uniones de galaxias de disco pudieran ser una fuente de combustible que alimente el agujero negro.

Algunos cuásares próximos semejan sistemas en interacción o fusión. Los choques galácticos suelen ir también asociados a otras clases de galaxias activas, entre ellas las Seyfert (una suerte de minicuásares inmersos en galaxias de disco) y las radiogalaxias (elípticas rodeadas por enormes regiones de radioemisión). Muchos astrónomos creen que esos objetos de alta energía son todos ellos galaxias perturbadas, donde la materia fluye hacia el interior de grandes agujeros negros centrales. Puede que buena parte de la diferencia entre las Seyfert, los cuásares y las radiogalaxias estribe en la masa del agujero negro central y en la tasa de deposición de materia en el mismo.

El colapso hacia el centro galáctico de las nubes de gas que provocan los brotes de formación de estrellas es insuficiente para arrastrar dicho gas hasta la vecindad de un agujero negro central. Para que pudiese consumirlo un agujero negro central de un millón de masas solares, todavía debe contraerse 10.000 millones de veces; pero, de nuevo, su momento cinético lo impide.

Para comprender el mecanismo de frenado que permitiese al gas caer hasta el centro mismo de la galaxia, donde está el agujero negro, se necesitarán simulaciones de ordenador más afinadas. No obstante, la teoría de las colisiones galácticas promete conducir a un modelo unificado que explique las características observadas de un amplio dominio de galaxias activas y especiales.

Los choques galácticos podrían explicar también el origen y evolución de una clase mucho más corriente y menos espectacular de objetos: las galaxias elípticas. Agrupa a una clase importante de galaxias, precedida sólo por las más fotogénicas espirales; su modo de formación constituye una de las principales cuestiones pendientes de la astrofísica. Se dan en todo el universo, pero tienden a congregarse en grandes cúmulos de hasta 1000 miembros. Abarcan desde sistemas gigantes, diez veces más luminosos que la Vía Láctea, hasta débiles elípticas enanas, como las satélites de la cercana galaxia de Andrómeda (M31), cuya luminosidad es la centésima parte de la que despide nuestra galaxia.

Las elípticas difieren, en sus rasgos fundamentales, de las galaxias espirales. Estas últimas son objetos en forma de disco, suelen contener mucho gas y en sus regiones más externas se encuentran muchas estrellas jóvenes. Las elípticas, por el contrario, son conglomerados casi amorfos, sólo poseen trazas de gas interestelar frío y carecen de estrellas jóvenes, o tienen pocas. El grueso de su luz lo emiten estrellas cuya edad se estima en al menos varios miles de millones de años. La distinción dinámica entre

ellas es bien sencilla: en las galaxias de disco, las órbitas estelares son muy ordenadas y casi todas descansan en el mismo plano; las estrellas constituyentes de las galaxias elípticas se mueven en órbitas aleatorias.

Guiados por esta distinción básica, los Toomre propusieron en 1972 que las galaxias elípticas resultan de la agregación de los residuos del choque de galaxias de disco. Hipótesis que no tardó en ser cuestionada. Resultaba plausible la idea según la cual los campos gravitatorios producidos al chocar y fundirse dos galaxias, por su extrema fluctuación, pudieran distribuir al azar las órbitas estelares y generar una acumulación desorganizada de estrellas. En aquella época, sin embargo, no había pruebas de que el resultado de la fusión remedara el comportamiento de las galaxias elípticas. Además, muchas propiedades de éstas admitían explicación en el seno de la hipótesis, entonces más asentada, de que se formaron a partir de nubes de gas en lenta rotación que se fueron enfriando y condensando a lo largo de mil o dos mil millones de años tras la gran explosión.

Para respaldar su hipótesis, los Toomre pusieron el énfasis en la fusión frecuente, en términos cósmicos, de las galaxias de disco de parejo tamaño. Considerada la edad del universo, las fusiones podrían dar cuenta de una importante fracción de la totalidad de las elípticas. Para corroborarlo, examinaron una muestra de 4000 galaxias. Hallaron once objetos que mostraban ya un par de colas emergentes de un cuerpo único de apariencia desordenada, ya un par de discos en interacción próxima y violenta. Se diría que los primeros se hubiesen unido durante los últimos 500 millones de años, mientras que los segundos lo harían, verosímilmente, antes de transcurrir otros 500 millones de años más.

Si las galaxias de disco hubiesen estado agregándose al ritmo actual durante unos 10.000 o 20.000 millones de años, deberían encontrarse al menos 100 restos de fusiones entre las 4000 galaxias. De hecho, la muestra por ellos usada contenía unas 400 elípticas. Bastaría con que, en el pasado, el ritmo de fusiones hubiera sido un poco mayor que ahora para que las colisiones pudiesen dar cuenta de todas las elípticas. Y a la inversa, si los resultados de las fusiones no se convirtieran en galaxias elípticas, ¿dónde habrían ido a parar?

Mientras tanto, habíase ahondado en el conocimiento de la dinámica de estas galaxias, que ofrecía una explicación preferible de su posible generación mediante fusiones. Los astrónomos supusieron durante mucho tiempo que la rotación global de algunas elípticas explicaba su figura oval. Pero, en 1975, Francesco Berola y Massimo Capaccioli, de la Universidad de Padua, dieron a conocer que la elíptica gigante aplastada NGC 4697 giraba con una velocidad máxima de sólo 60 kilómetros por segundo. Al parecer, es la distribución de las órbitas estelares, más que la rotación de la propia galaxia, lo que produce el aplastamiento. Las fusiones podrían crear tales distribuciones estelares asimétricas, posibilidad que animó a los investigadores que trabajaban en el modelado informático de interacciones galácticas.

Los primeros intentos se refirieron





6. VARIACION DE LOS CUMULOS GALACTICOS en cuanto a forma, densidad y población galáctica. El cúmulo de Hércules (*arriba*) contiene cierto número de galaxias de disco en interacción; la forma global del cúmulo es irregular. Coma (*abajo*) es denso y casi esférico, abundoso en brillantes galaxias elípticas, posible indicio de que en él se ha producido gran cantidad de fusiones.

a interacciones sencillas entre galaxias esféricas. Aunque su detalle era muy distinto de las simulaciones más realistas de galaxias de disco que acompañan a este artículo, proporcionaron importantes conclusiones sobre los efectos de la fusión. Cuando el brillo superficial de una galaxia elíptica se representa en función de la distancia al centro, la forma de la curva resultante es casi siempre la misma. Hacia finales de los años setenta, Simon D. M. White, de la Universidad de Cambridge, mostró que las fusiones producían objetos cuyos perfiles de brillo se asemejaban mucho a los de las galaxias elípticas. Estudios ulteriores confirmaron que este perfil de luz característico se da siempre que una galaxia evoluciona en el seno de un campo gravitatorio muy variable.

Estas primitivas simulaciones se ocupaban de algunos cientos de partículas solamente, modelos suficientes para estudiar algunos aspectos del comportamiento de las galaxias esféricas, pero no para acercarse a un disco en rotación, enfoque que requiere miles de ellas. Hasta mediados de los años ochenta no se pudo someter a prueba la hipótesis de que dos galaxias de disco podían soldarse para generar un objeto único dotado de las propiedades de una elíptica. Recientes cálculos efectuados por nosotros y por otros grupos de investigación dan como resultado de las fusiones objetos cuyo perfil de brillo, forma y lenta rotación se asemejan a los típicos de grandes galaxias elípticas.

La hipótesis de la fusión predice relaciones bien definidas entre las propiedades de las elípticas y las de las galaxias de disco que las originaron. La progresiva realización de un mayor número de cálculos y de observaciones galácticas permitirá establecer comparaciones cada vez más finas entre resultados de fusiones y galaxias elípticas normales. Es así como se está poniendo a prueba la validez de la hipótesis de la fusión y acotando su campo de aplicabilidad.

No todas las propiedades de las elípticas pueden explicarse por fusiones entre galaxias de disco ordinarias. Por ejemplo, las elípticas brillantes giran lentamente, cosa que no hacen las débiles. El proceso de fusión es insensible a la escala, de modo que no ofrece razón aparente por la que los restos brillantes de fusiones deban girar a velocidad diferente de los débiles. Las elípticas más débiles presentan una ulterior dificultad a la hipótesis de la fusión, al no haberse identificado progenitores suyos plausibles.

Las velocidades de encuentro entre las galaxias elípticas enanas son grandes en relación con sus velocidades internas, por cuya razón rara vez se fusionan, si es que lo hacen alguna. De todo ello se infiere que, o bien las elípticas más débiles no se formaron por fusión, o bien lo hicieron bajo circunstancias muy diferentes de las que produjeron las brillantes. Una conjetura ya antigua, aunque carente de fundamento empírico, es que algunas enanas sean fragmentos aislados de colas de marea producidas durante encuentros entre galaxias de disco.

De hecho, hay muy pocas pruebas directas de las circunstancias en que se formaron incluso las elípticas brillantes. Las mayores de ellas se integran en cúmulos "ordinarios" y ricos, como el de la Coma, agrupamientos que contienen cientos o miles de galaxias en un enjambre más o menos esférico. Aunque se producen choques en ellos, no originan fusiones, o muy pocas, porque las galaxias se mueven muy rápidamente una respecto a la otra, y no les da tiempo a soldarse. La mayoría de las fusiones operadas en el cúmulo ocurrieron contemporáneamente al nacimiento de esa agrupación. Las formas regulares y las altas densidades centrales de esas estructuras galácticas inducen a pensar que debieron constituirse transcurridos pocos miles de millones de años desde la gran explosión.

Los astrónomos no pueden remontarse todavía en el espacio y en el tiempo lo suficiente para observar los cúmulos ricos de galaxias mientras se están formando, pero tal vez sí puedan encontrar entornos próximos donde se desarrollen en la actualidad procesos semejantes. Las elípticas más luminosas podrían ser el resultado de repetidas fusiones en las que participaran muchas galaxias de disco. Tales fusiones múltiples se darían en grupos compactos de cuatro o cinco galaxias interactuantes. Los modelos numéricos indican que el proceso se prolongaría varios miles de millones de años, produciendo restos de la fusión de mayor masa todavía, pero de estructura semejante a la característica de las galaxias elípticas.

Hay cúmulos de galaxias que tienen grupos compactos de este tipo, por lo que se les podría comparar con los cúmulos corrientes captados en el momento de su formación. Poseen esos cúmulos una morfología irregular, carecen de un núcleo definido y suelen albergar una proporción de galaxias espirales mucho mayor que la de los cúmulos ricos. Un rápido examen visual del cúmulo irregular de Hércules revela un gran número de pares de galaxias en interacción. A lo largo de miles de millones de años, es probable que muchos de esos pares se fusionen. Mientras tanto, el cúmulo entero continuará evolucionando, haciéndose menos irregular y más esférico. El resultado final podría asemejarse a un cúmulo regular de los que abundan en las galaxias elípticas.

Si las elípticas de los cúmulos ricos se formaron por fusiones múltiples, sería cuando el universo estaba todavía en su infancia. Las galaxias implicadas pudieron haber sido versiones inmaduras de las que se observan hoy, con más gas y tal vez distinto contenido estelar. Las elípticas cumulares podrían ser fósiles que conserven algunas propiedades de las galaxias que las originaron. Tal posibilidad podría explicar por qué algunas elípticas de gran masa están rodeadas por un número elevado de cúmulos globulares, conjuntos esféricos de hasta un millón de estrellas, apretadamente dispuestos, y que presentan algún parecido con elípticas en miniatura. Cabría otra explicación: durante las fusiones galácticas se formarían nuevos cúmulos globulares.

Los cuásares abundaron en el universo primitivo; bastante más que hoy. Como hemos visto, las fusiones entre galaxias podrían activar cuásares o desencadenar comportamientos de índole similar. Si las elípticas agrupadas en cúmulos proceden verdaderamente de choques galácticos, tales sucesos debieron menudear en los albores de la historia del universo, antes de que aparecieran los cúmulos ricos. Tan alta tasa de fusiones podría explicar también la gran cantidad de cuásares en partes muy distantes, y por ende muy jóvenes, del universo.

Carecemos de medios todavía para contrastar la hipótesis de que los cuásares remotos se den en interacciones galácticas. Salvo cuando están cerca, el resplandor de los núcleos brillantes casi eclipsa la estructura circundante. Pero a medida que las técnicas de observación y los modelos informáticos se perfeccionen, podríamos llegar a triunfar en el empeño de relacionarlos con la formación de galaxias muy parecidas a las que observamos en nuestra vecindad cósmica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVOLUTION OF COMPACT GROUPS AND THE FORMATION OF ELLIPTICAL GALAXIES. Joshua Barnes en *Nature*, vol. 338, n.º 6211, págs. 123-126; 9 de marzo de 1989.

COLLIDING GALAXIES: THE UNIVERSE IN TURMOIL. Barry Parker. Plenum Press, 1990.

DYNAMICS AND INTERACTIONS OF GALAXIES. Dirigido por Roland Wielen, Springer-Verlag, 1990.

El telómero humano

Aunque este remate de ADN, situado a ambos extremos del cromosoma, no contiene genes, reviste singular interés en el proceso de la división celular y resulta imprescindible para la supervivencia del material hereditario

Robert K. Moyzis

El premio Nobel Hermann J. Muller sostuvo, hace más de medio siglo, que los segmentos que se encuentran en los extremos de los cromosomas desempeñan un papel crítico en la célula. Cuando no se sabía aún que el ADN cromosómico constituía una doble hebra que portaba los genes, Muller comprendió que el material situado en los extremos remataba a los cromosomas para protegerlos de la desintegración. Bautizó esas terminaciones con el nombre de telómero, construido a partir de las voces griegas *telos*, extremo, y *meros*, parte.

Transcurrieron varias décadas sin que se conociera mucho más de los telómeros. Hace unos 10 años comenzó a descifrarse su estructura en varias especies. Pero se resistía el descubrimiento de la composición del telómero humano. Hoy no encierra ya ningún misterio.

Hace unos años, desarrollé con mi equipo del Laboratorio Nacional de Los Alamos nuevas técnicas que nos permitieron clonar el telómero humano, identificar su secuencia de nucleótidos (componentes básicos del ADN) y recabar más información sobre su estructura tridimensional y su función en la célula.

En el curso de nuestros experimentos, confirmamos que el telómero, estructura carente de genes, resulta imprescindible para la supervivencia del cromosoma. Hallazgo que presta respaldo a la idea, cada vez más aceptada, según la cual las regiones libres de genes de los cromosomas desempeñan a menudo funciones críticas en la célula, aun cuando no puedan especificar la secuencia de aminoácidos de las proteínas corporales. (Las proteínas son fundamentales para todos los procesos biológicos.) Es evidente que quienes se dispongan a desentrañar el funcionamiento de cromosomas o de genes particulares tendrán que identificar las secuencias de ADN, no sólo de los genes sino también de muchas regiones sin ellos. Deberán, asimismo, determinar de qué forma interaccionan entre sí las diversas partes de un mismo cromosoma.

La clonación del telómero humano contribuye a ese ambicioso empeño, al facilitar el avance del Proyecto del Genoma Humano en los Estados Unidos y de otros programas de investigación similares abordados fuera de ese país. Proyecto y programas que se han fijado como meta cartografiar el genoma humano (la dotación entera de cromosomas que corresponde a la célula) y señalar la ubicación de cada gen. Así como la determinación de los extremos de un rompecabezas simplifica su resolución, la descripción de los extremos de los cromosomas humanos debería facilitar el poder completar los mapas cromosómicos. Conforme avance el proceso cartográfico, los investigadores descubrirán, con toda seguridad, las raíces genéticas de muchas enfermedades y sacarán a la luz de qué manera los cromosomas dirigen el desarrollo y aseguran la actuación correcta de las células.

Cuando nos dispusimos a clonar el telómero humano, sólo contábamos con el conocimiento de sus probables funciones y un manojo de referencias relativas a su composición. Sabíamos, por ejemplo, del trabajo pionero de Muller. Los experimentos de éste con la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* y otros similares realizados con el maíz por Barbara McClintock, del Laboratorio de Cold Spring Harbor, pusieron de manifiesto que los extremos rotos, o inducidos, de los cromosomas eran inestables y, estables, las terminaciones enteras. Los extremos rotos no tardaban en degradarse o en combinarse con otros cromosomas. De esa suerte de observaciones Muller dedujo que las regiones teloméricas, a diferencia de otras, permitían que las células retuvieran los cromosomas constituidos en entidades intactas y diferenciadas.

Se cree también que los telómeros impiden que los cromosomas se acorten durante el proceso de su replicación. Este truncamiento es potencialmente letal, ya que puede eliminar genes. Se infirió esa misión protectora tras advertir cierta peculiaridad de la maquinaria que duplica al ADN lineal, así el del genoma humano, antes de que las células se dividan.

Las enzimas que controlan la replicación adolecen de un punto flaco inquietante: cuando copian el ADN, tienden a omitir nucleótidos en uno

ROBERT K. MOYZIS dirige el Centro de Investigación sobre el Genoma Humano en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Se doctoró en biología molecular por la Universidad Johns Hopkins, donde enseñó antes de trasladarse a Los Alamos para encabezar un grupo de genética en 1984. Aceptó su puesto actual en 1989. Moyzis es miembro de los comités nacionales que la administración de su país ha creado para supervisar el trabajo que se realiza en la cartografía y secuenciación de los cromosomas humanos.

1. TELOMEROS, así se llaman los segmentos de ADN que ponen remate a los cromosomas. Podemos identificarlos en los cromosomas humanos (*naranja*) mediante una sonda fluorescente (*amarillo*) capacitada para reconocer la secuencia nucleotídica *TTAGGG*, donde las letras abrevian el nombre de nucleótidos (bloques constructores de la molécula de ADN) que poseen las bases timina, adenina y guanina. Esas representaciones facilitaron la demostración de la naturaleza del telómero humano: un segmento constituido por la repetición de miles de unidades *TTAGGG*. Los cromosomas de la figura se encuentran en metafase, en la que cada cromosoma se ha replicado de cara a la división celular, si bien los pares resultantes no se han separado todavía unos de otros.

de los extremos de cada nueva cadena. Si la célula no dispusiera de mecanismos que contrarrestaran ese efecto, los cromosomas se irían acortando progresivamente a lo largo de las sucesivas generaciones celulares.

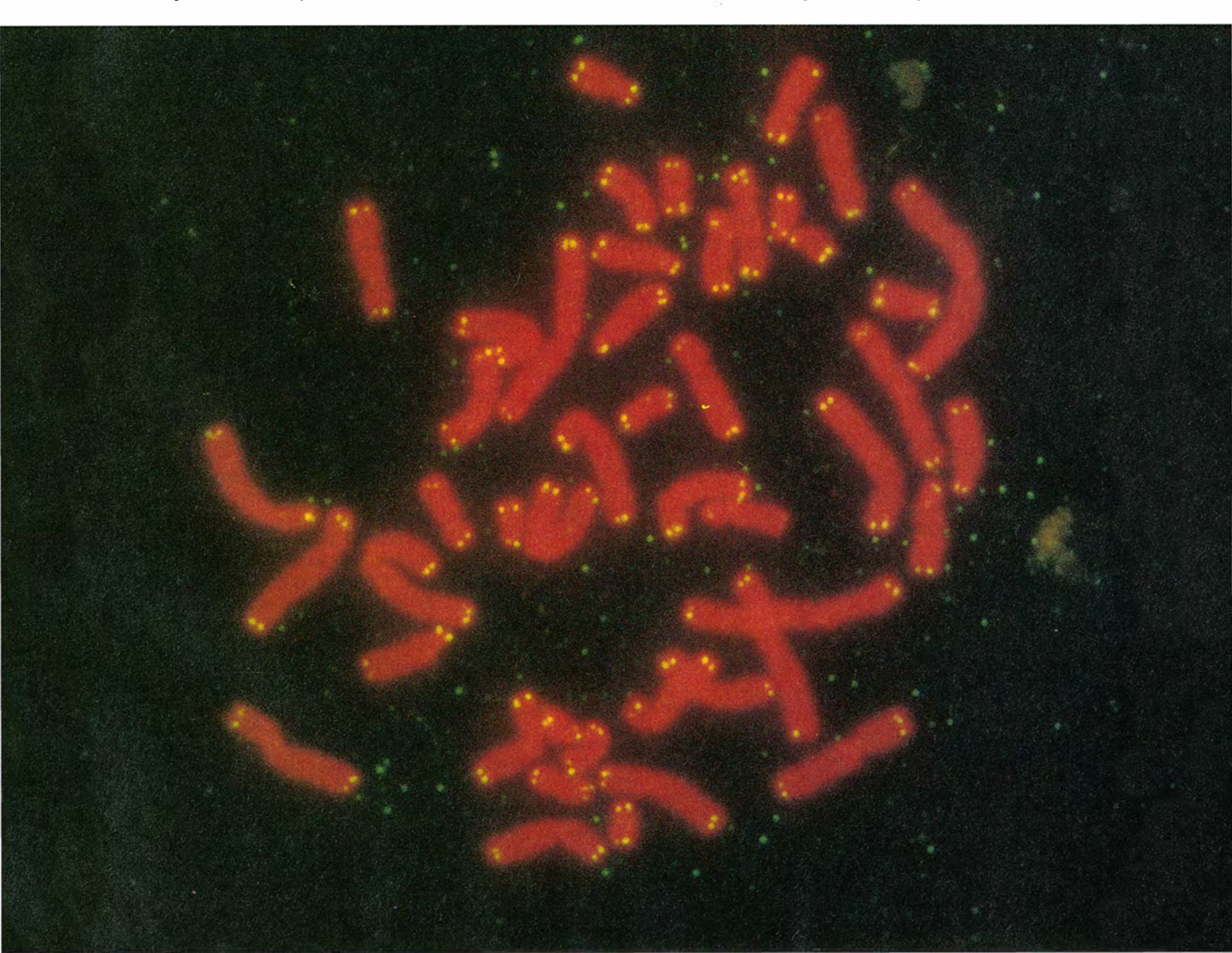
Cierto recorte quizá no incidiera mucho en las células somáticas, en las no reproductoras, con tal de que se conservaran parte del telómero y todos los genes. Pero la abreviación progresiva resultaría, andando el tiempo, devastadora para la especie, si ocurriera en las células germinales (óvulos y espermatozoides), originadoras de los nuevos miembros de la especie. El hecho de que el ADN humano y de otras especies no hubiera sufrido semejante proceso de acortamiento implicaba que los extremos de los cromosomas —los telómeros— de las cadenas primigenias habían funcionado como centinelas que anularon los riesgos enzimáticos en los extremos.

A la hora de diseñar el plan de clonación del telómero humano, partíamos del supuesto de que éste se presentaba más de una vez en cada célula, pues debía alojarse en los extremos de cada cromosoma. Todas las células somáticas humanas contienen 46 cromosomas: un complemento de 22 se hereda de la madre y otro complemento homólogo del padre, así como también un par de cromosomas sexuales (un X de la madre y un X o un Y del padre).

Sospechábamos también que el ADN telomérico, además de encontrarse repetido muchas veces en la célula, podría contener secuencias de nucleótidos reiteradas, o consistir en ellas. Respaldaban esa estructura dos motivos: determinada característica, perfectamente conocida del genoma humano, y los estudios acometidos con otros organismos.

Un 25 por ciento del ADN humano está formado por agrupaciones de nucleótidos que se presentan más de una vez en cada célula. Aunque algunas de tales secuencias repetitivas se hallan esparcidas por todo el ADN, otras se repiten muchas veces en fila, a semejanza de un tartamudeo en el ADN. Estas secuencias repetitivas en tándem suelen ubicarse en regiones críticas, alrededor del centrómero sobre todo, que garantiza la correcta distribución de los cromosomas en las células hijas durante la división celular. Además, las agrupaciones repetitivas ("clusters") de dichas unidades crean generalmente estructuras tridimensionales poco corrientes, que podrían encerrar algún significado funcional para la célula. De ese haz de descubrimientos inferíase que las secuencias repetitivas podrían cumplir misiones específicas en los cromosomas y que la capacidad del telómero de rematar a los cromosomas e impedir su acortamiento podría deberse a las unidades repetitivas que contenía.

Esta hipótesis se reforzó con el estudio de los telómeros en otros organismos. Elizabeth H. Blackburn y Joseph G. Gall, de la Universidad de Yale, lograron aislar el primer telómero, en el microorganismo *Tetrahymena thermophila*. Se concentraron en *T. termophila* porque, en ciertas fases de su ciclo biológico, el ADN telomérico constituye una fracción importante del genoma.



Cuando se encuentra en estas fases, el microorganismo rompe segmentos de sus cromosomas y los multiplica ("amplifica"), generando unas 10.000 copias de cada uno de los "minicromosomas" resultantes. Estas unidades multiplicadas y relativamente cortas, que contienen telómeros intactos para asegurar su estabilidad, se aíslan fácilmente del resto del ADN y permiten determinar su secuencia de nucleótidos. Los análisis revelaron que los extremos de los minicromosomas estaban formados por múltiples repeticiones en tándem de la secuencia *TTGGGG*.

Esta notación es, en cierto sentido, taquigráfica. Los nucleótidos se hallan constituidos por un azúcar, un grupo fosfato y una base de las cuatro siguientes: timina (*T*), guanina (*G*), adenina (*A*) o citosina (*C*); por eso los genéticos acostumbran representar los nucleótidos con sólo el símbolo de sus bases. La timina de una cadena del ADN se aparea con la adenina de la cadena complementaria, y la guanina con la citosina. Por tanto, la notación *TTGGGG* significa que los nucleótidos de timina están apareados con los nucleótidos de adenina de la cadena complementaria y que, igualmente, los nucleótidos de guanina están apareados con los de citosina.

Ni que decir tiene que era mejor conocer una secuencia telomérica que ninguna, pero la cantidad, 100 veces mayor, de ADN en las células humanas (con unos 6000 millones de pares de nucleótidos) y la relativa escasez de telómeros (sólo dos en cada cromosoma) nos indicaban que el aislamiento del telómero humano requería otras estrategias. A nadie extrañó, pues, que pasaran varios años sin que se registraran avances sólidos.

Pero se trabajó. Muchos laboratorios, incluido el de Blackburn, asentada ya en la Universidad de California en Berkeley, realizaron en ese intervalo valiosos experimentos que demostraron que los telómeros de distintos organismos eucariotas unicelulares (ni bacterias, ni virus) eran similares a los de *T. thermophila*. Todos constaban de secuencias simples repetitivas y ricas en guanina que se ajustaban a la fórmula general $(T/A)_{1\text{-}4}(G)_{1\text{-}8}$. Dicho de otro modo: la unidad repetitiva en una cadena de ADN comprende de uno a cuatro nucleótidos de timina o adenina (o una mezcla de ambos) y de uno a ocho nucleótidos de guanina. Las unidades más frecuentes incluyen tres o cuatro nucleótidos de guanina.

Apoyados en la importancia que tenían los telómeros para la estabilidad y la correcta replicación de los cromosomas, mi equipo pensó que la versión humana, además de poseer unidades repetitivas, podría ajustarse a la misma fórmula descrita en otros eucariotas. Después de todo, resultaba inverosímil que estructura tan vital y adaptativa hubiera variado caprichosamente a lo largo de la evolución; antes bien, tendería a conservarse, sobre todo en las especies pertenecientes al mismo orden.

Si nuestra sospecha de que el telómero humano incluía una secuencia conservada y repetitiva iba bien encaminada, podríamos acotar la búsqueda de la secuencia en cuestión exponiendo una biblioteca o colección de clones de ADN humano a sondas constituidas por ADN repetitivo de otro mamífero, un roedor por ejemplo. (Si determinado segmento de ADN se halla en una biblioteca nos lo descubre la sonda integrada por una secuencia idéntica o similar de otro organismo.) Esperábamos, pues, que el ADN telomérico de un roedor reconociera al ADN telomérico humano, y que la información que poseíamos sobre las características terminales nos permitiera distinguirlo de otros ADN repetitivos elegidos por nuestras sondas.

El método usual para aislar un segmento específico de una biblioteca no encierra particular dificultad. Se somete el ADN de la biblioteca a una solución que separa ambas cadenas del dúplex. Se introducen luego las cadenas sencillas de la sonda. Si la sonda encuentra las bases complementarias en la biblioteca, se apareará con ellas y formará un segmento de ADN dúplex; ese proceso recibe el nombre de hibridación. Tras lo cual se pueden aplicar distintas técnicas para purificar la sonda unida al ADN e identificar su secuencia de nucleótidos.

Muchos estudios realizados en otros laboratorios apoyaban nuestra idea de que el ADN de roedor serviría para descubrir el telómero humano. La investigación había demostrado, en efecto, que, cuando se obligaba a las células de roedores a incorporar cromosomas humanos, las células no destruían los cromosomas extraños; el ADN humano se replicaba en cada división celular. Si el telómero humano difiriese mucho del telómero del huésped, las moléculas encargadas de proceder a la replicación en las células del roedor no estarían capacitadas para reconocerlo, ni probablemente podrían copiar el ADN.

Nuestro plan básico de acción era razonable, pero teníamos un problema. Con independencia del tipo de sondas elegidas, parecía poco probable que pudiéramos aislar el telómero humano a partir de las bibliotecas existentes de ADN humano.

La mayoría de las bibliotecas se construyen con la ayuda de enzimas de restricción, que reconocen secuencias de nucleótidos cortas y específicas, dispersas por los cromosomas, cortando el ADN por esas mismas secuencias. Otras enzimas se encargan de incorporar los fragmentos en plás-

2. PARTES FUNDAMENTALES DE UN CROMOSOMA HUMANO, esquematizadas. Se supone que cada bucle contiene uno o más genes, segmentos de los cromosomas que codifican proteínas. Los cilindros representan segmentos de ADN que, si bien no determinan proteínas, revisten interés para la estabilidad o actividad de los cromosomas; sobre todo, los telómeros, los segmentos de unión a la matriz (que podrían constituir también el origen de replicación donde comienza la síntesis de ADN) y el centrómero. Los centrómeros aseguran la segregación correcta de los cromosomas.

Contrucción de una biblioteca dotada de ADN telomérico

Las bibliotecas típicas de ADN facilitan la clonación de muchos genes; carecen, sin embargo, de ADN telomérico (*izquierda*). Para aislar el telómero de las células humanas, el autor hubo de construir con su equipo una biblioteca que incorporara las secuencias de nucleótidos teloméricas (*derecha*). Sabiendo que el telómero estaba formado, probablemente, por muchas repeticiones de una secuencia fija, eliminó también el ADN sin reiterar de la librería.

BIBLIOTECA TIPICA

ADN HUMANO

BIBLIOTECA DE ADN REPETITIVO

TELOMERO

1 Se corta el ADN con una enzima de restricción

2 La misma enzima sirve para cortar los plásmidos

3 Se combinan el ADN humano y los plásmidos

PLASMIDO RECOMBINANTE

(El ADN telomérico se muestra incapaz de unirse con el plásmido; se le degradará en el paso siguiente)

4 Se insertan los plásmidos recombinantes en *E. coli*

5 Se deja que las células bacterianas se reproduzcan. Cada colonia resultante está formada por células idénticas y contiene clones —copias idénticas— de un solo fragmento de ADN humano

BIBLIOTECA DE CLONES (CARECE DE ADN TELOMERICO)

1 Por medios mecánicos se despedaza el ADN

FRAGMENTO TELOMERICO

2 Se separan las cadenas; se deja que las secuencias repetitivas se asocien

3 Se elimina el ADN sin asociar (no repetitivo) y se añaden colas de nucleótidos de citosina al ADN restante (■)

4 Se combina el ADN con los plásmidos cortados a los que se han añadido colas de nucleótidos de guanina (■)

5 Se insertan los plásmidos recombinantes en *E. coli*

6 Se deja que *E. coli* se reproduzca

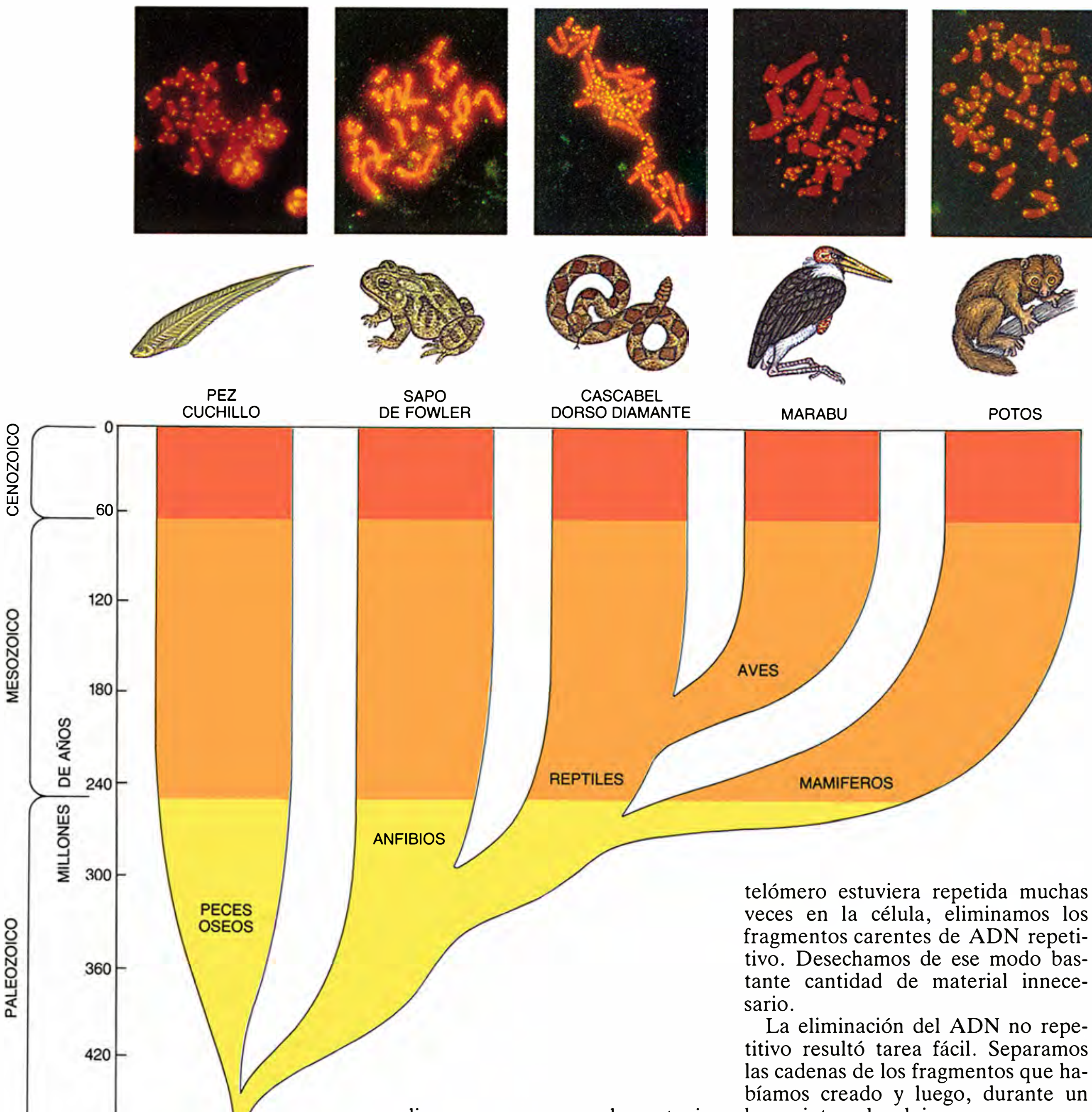
BIBLIOTECA DE CLONES (CONTIENE ADN TELOMERICO)

Podremos aislar cualquier secuencia de ADN que haya en la biblioteca siempre que dispongamos de la sonda capaz de aparearse con la misma

midos (ADN dúplex circular de las bacterias) u otros tipos de ADN circular, cortados a su vez por la misma enzima de restricción. El empleo de una misma enzima de restricción asegura que los extremos libres de los fragmentos y los extremos de los círculos cortados puedan aparearse. Los círculos modificados genéticamente, o vectores, se introducen luego en una bacteria, *Escherichia coli* por lo común, donde se replican libremente. Cada célula bacteriana origina muchas copias idénticas, o clones, del vector y, por tanto, del ADN humano insertado. El conjunto completo de clones de ADN humano purificado por las células bacterianas integra la biblioteca.

Por desgracia, cuando las enzimas de restricción parten los cromosomas, los fragmentos de los extremos, que contienen al telómero completo junto con otros nucleótidos, sólo poseen una punta cortada por la enzima. El otro extremo, distal, presenta intacto su ADN original. La sección cortada puede engarzarse en un vector, pero el otro extremo no; ello significa que la porción que mantiene entero su ADN completo no formará parte de la biblioteca. Aun cuando el extremo natural pudiera unirse al vector, el fragmento telomérico resultaría quizá demasiado grande para que el vector lo incorporase.

Era, pues, evidente que, si queríamos acotar el ADN telomérico en una biblioteca humana, no había más re-



3. SONDA FLUORESCENTE que reconoce la secuencia teloméricahumana *TTAGGG* (*puntos amarillos en las microfotografías*). La sonda se ha unido a los extremos de los cromosomas extraídos de los animales que se citan. Nos ha servido para identificar los extremos de los cromosomas de cada pez óseo, anfibio, reptil, ave o mamífero estudiado hasta ahora (más de 100 especies en total). Los datos indican que los telómeros de los cinco grupos son idénticos, aun cuando las especies no compartan ningún antecesor común en los últimos 400 millones de años. Vale la pena destacar semejante conservación de una secuencia de ADN a lo largo de tanto tiempo.

medio que crear una que lo contuviera. Resolvimos el problema prescindiendo de las enzimas de restricción. En nuestro ensayo, los cromosomas avanzaban mecánicamente a través de una jeringa provista de una aguja fina calibrada. Rompíase así el ADN en pequeños fragmentos, entre los cuales habría de contarse los del telómero.

Podíamos haber contruido luego una biblioteca insertando los fragmentos en plásmidos (utilizando una técnica habitual) e introduciendo los plásmidos en bacterias. Sin embargo, para simplificar el proceso de selección de clones, introdujimos otro paso entre la etapa de rotura del ADN y la etapa de inserción. Como esperábamos que la unidad básica del telómero estuviera repetida muchas veces en la célula, eliminamos los fragmentos carentes de ADN repetitivo. Desechamos de ese modo bastante cantidad de material innecesario.

La eliminación del ADN no repetitivo resultó tarea fácil. Separamos las cadenas de los fragmentos que habíamos creado y luego, durante un breve intervalo, dejamos que se apareasen los segmentos complementarios. Sólo las secuencias repetitivas se encuentran en múltiples copias; por consiguiente, encuentran a sus complementarias mucho antes que las secuencias de copia única, obligadas éstas a buscar su complementaria perdida en algún lugar de la "sopa" de ADN. Como remate, eliminamos por métodos enzimáticos todo el ADN sin hibridar, es decir, el ADN no repetitivo.

Completada la biblioteca, volvimos a nuestro plan: localizar, en el ADN humano, las secuencias repetitivas conservadas. Cuando expusimos los clones de ADN de nuestra nueva biblioteca a la acción del ADN repe-

titivo de hámster, marcado radiactivamente, observamos que había dos clones, de un total de miles, que contenían una posible secuencia telomérica. Ambos clones estaban formados por repeticiones en tándem de la secuencia *TTAGGG*, que encajaba con la fórmula general de los telómeros de otras especies. La fórmula exacta se había encontrado con anterioridad en el telómero del parásito microscópico *Trypanosoma brucei*.

¿Habíamos conseguido identificar la unidad básica del telómero humano? La investigación progresaba con firmeza. Nos servimos primero de la citometría de flujo, una técnica explorada en Los Alamos que emplea los láseres para identificar y separar cromosomas. Con este método determinamos que cada cromosoma contenía secuencias repetidas *TTAGGG*, según cabía esperar de una secuencia telomérica. Pero no logramos localizar dichas secuencias repetidas en los cromosomas.

Más tarde, con mis colegas Julianne Meyne y Robert L. Ratliff demostré visualmente, mediante la técnica de hibridación *in situ*, que había, en ambos extremos de los cromosomas de las células humanas, largos segmentos formados por las secuencias repetidas. Estos segmentos terminales se expresan a menudo mediante $(TTAGGG)_n$, donde *n* indica un número sin especificar de repeticiones.

Llevamos a cabo la hibridación separando de las células humanas los cromosomas, inmovilizándolos en portaobjetos y abriendo las cadenas de la doble hélice. A continuación, aplicando una técnica desarrollada por David C. Ward, de Yale, añadimos el compuesto biotina a una sonda sintética diseñada para hibridarse con la secuencia *TTAGGG* y colocamos la sonda biotinilada sobre los portaobjetos. Introdujimos avidina marcada con fluorescencia, que se une fuertemente a la biotina. Por último, amplificamos la señal de la avidina mediante anticuerpos marcados con fluorescencia que reconocían específicamente a la avidina.

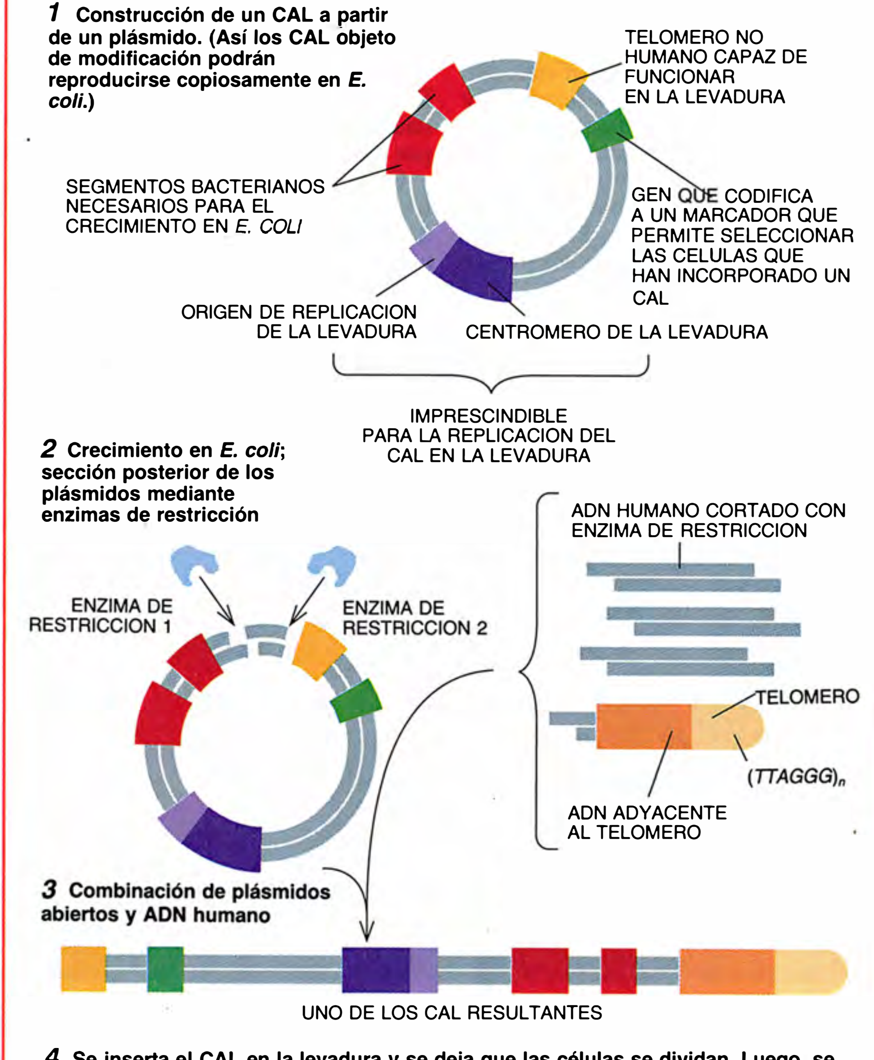
Las imágenes que observamos con el microscopio de fluorescencia no daban lugar a dudas: la sonda se situaba en los extremos de cada cromosoma y no reconocía ninguna otra sección. Pero no podíamos determinar si la sonda se había hibridado con los pocos nucleótidos finales de los cromosomas o lo había hecho con alguna sección próxima a los extremos.

Para corroborar lo que veíamos, expusimos brevemente el ADN cromosómico a la acción de *Bal*31, enzima que va eliminando, progresivamente y desde los extremos, las moléculas de ADN dúplex lineal. Las secuencias *TTAGGG* fueron las primeras en desaparecer, lo que confirmaba su ubicación en los extremos. Este y otros experimentos pondrían también de manifiesto que cada telómero humano estaba formado por 250 a 1500 secuencias *TTAGGG* repetidas. La mayor parte de la variabilidad se presenta entre diferentes tipos celulares, siendo los cromosomas de los espermatozoides los que poseen los telómeros más largos.

Después de estos experimentos estábamos convencidos de haber identificado realmente al telómero humano. Pero continuamos buscando la ratificación. Una prueba firme de que la secuencia repetitiva *TTAGGG* persistía en muchas especies, y no la compartíamos sólo con el hámster y un parásito, consolidaría esa ratificación. Por tanto, aplicamos la hibridación *in situ* al ADN de más de un centenar de especies de vertebrados. Incluimos en nuestra agenda de trabajo mamíferos, aves, reptiles, anfibios y peces óseos, organismos que carecían de un antecesor común en más de 400 millones de años.

Construcción de un CAL para clonar ADN humano

El telómero humano, junto con el ADN adyacente en el mismo cromosoma, puede insertarse en cromosomas artificiales de levadura (CAL), como el que se obtiene en el apartado 3, y replicarse en las células de dicho hongo. Se separa luego el ADN humano multiplicado en numerosas copias ("amplificado") para determinar su secuencia. Esta técnica ha permitido conocer la composición del ADN adyacente al telómero de algunos cromosomas.



Diseñamos los experimentos procurando que la hibridación se produjera en el caso exclusivo de que la sonda encontrase la secuencia *TTAGGG*, pero no si daba con otra secuencia similar, la *TAAGGG* por ejemplo. La secuencia humana se encontró en los telómeros de todas las especies analizadas; era éste un descubrimiento notable, pues el orden de los nucleótidos tiende a cambiar rápidamente con el tiempo en la mayor parte del genoma. Para situar nuestro descubrimiento en su perspectiva histórica, considérese que la secuencia telomérica $(TTAGGG)_n$ apareció verosímilmente mucho antes de que los dinosaurios poblaran la Tierra. Por tanto, es probable que los telómeros de los cromosomas de los dinosaurios, si pudieran analizarse, fuesen idénticos a los de los cromosomas humanos.

Desde luego, la prueba definitiva de que la secuencia $(TTAGGG)_n$ constituía el telómero humano consistiría en demostrar que opera como tal en las células humanas. El diseño ideal estribaría en insertar la secuencia en un cromosoma artificial que poseyera sólo el supuesto telómero y segmentos de ADN humano imprescindibles para la replicación del cromosoma, es decir, un origen de replicación (donde comienza la síntesis de ADN) y un centrómero. Si este cromosoma "desmontado" se mantuviera intacto en las células humanas y se replicara sin que sus extremos se acortasen, podríamos estar seguros de que la secuencia $(TTAGGG)_n$ es la responsable y, por tanto, el telómero.

Por desgracia, nadie ha podido construir un cromosoma artificial completamente humano, por la poderosa razón de que no se conocen todavía las secuencias cruciales para el funcionamiento del centrómero humano. Sin embargo, puede realizarse un experimento similar con los cromosomas artificiales de las levaduras (CAL). Nuestros colaboradores Harold C. Riethman, David T. Burke y Maynard V. Olson, de la Universidad de Washington en St. Louis, construyeron CAL que contenían el supuesto telómero humano, en vez del telómero de la levadura. Cuando este ADN "quimérico" se insertó en células de levadura, el cromosoma sobrevivió y se replicó correctamente, lo que demostraba que la secuencia humana $(TTAGGG)_n$ se comportaba como un genuino telómero. Los laboratorios de William R. Brown, de la Universidad de Oxford, Howard J. Cooke, del Consejo de Investigación Médica de Edimburgo, y Charles R. Cantor, entonces en la Universidad de Columbia, llegaron, cada uno por su lado, a resultados similares.

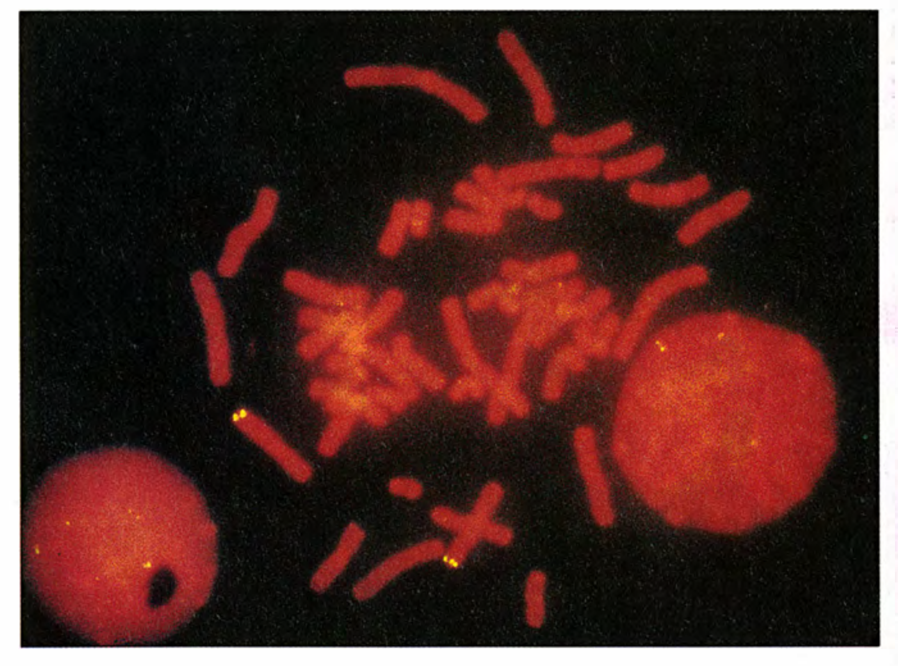
Como la divergencia evolutiva entre las levaduras y el hombre se produjo hace más de mil millones de años —lo que significa que esencialmente no están relacionados—, el fracaso del experimento no hubiera invalidado necesariamente nuestras conclusiones anteriores. Ahora bien, el hecho de que hasta las células de levadura, cuyos telómeros ofrecen mayor variabilidad, reconozcan la secuencia humana como un telómero constituye una prueba adicional de que el segmento de ADN que aislamos de nuestra biblioteca era, en verdad, el telómero humano.

Una vez establecida la identidad del telómero humano, nuestro grupo, entre otros, comenzó a explotar las posibilidades de los CAL que contenían el telómero humano para nuevos fines; por ejemplo, el de identificar las secuencias de nucleótidos adyacentes a los telómeros en cada cromosoma. Los CAL resultan para ello imprescindibles, ya que pueden contener fragmentos de hasta 500.000 nucleótidos o más. Los plásmidos, por el contrario, admiten sólo unos 40.000 nucleótidos adicionales.

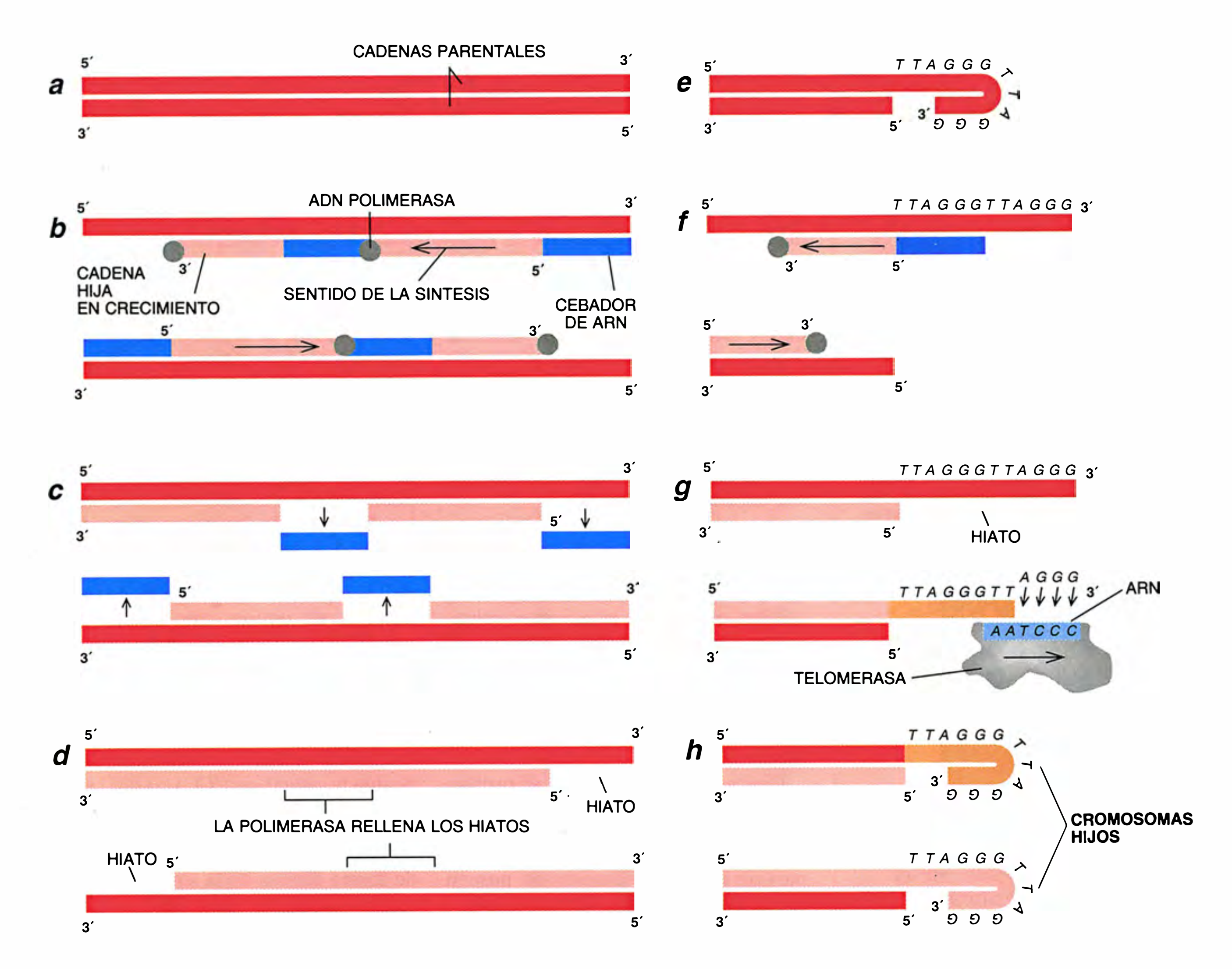
Estos esfuerzos están contribuyendo a encajar las piezas en los mapas de los cromosomas humanos. Los mapas actuales recuerdan las representaciones geográficas del siglo XVI, en las que algunas regiones se describían con fino detalle, en tanto que otras —el Nuevo Mundo, por ejemplo— se difuminaban en aproximaciones hipotéticas de los límites de continentes enteros.

Hasta hace poco, se determinaba la ubicación de un gen por la vía indirecta de medir su distancia de los marcadores de ADN (secuencias de nucleótidos que se heredan a menudo junto con un gen particular). La frecuencia con la que un gen y un marcador se heredan en tándem se traduce en una estimación aproximada de la distancia que media entre ambos; las frecuencias más altas indican posiciones más próximas en el cromosoma. La comparación de los modelos de herencia de cierto número de marcadores proporciona su ubicación aproximada y, por tanto, la posición aproximada del gen asociado.

Solía ocurrir antaño que, cuando se sospechaba que un marcador se encontraba próximo al extremo de un cromosoma, descubríase otro marcador nuevo que obligaba a desplazar el extremo unos millones de nucleótidos más. Hoy podemos ya establecer si un marcador está realmente cerca del extremo: clonando el telómero y el ADN adyacente en CAL y midiendo directamente la distancia entre algún punto del material clonado y el marcador. Con el tiempo, deberíamos adquirir la capacidad de determinar la localización de todos los marcadores



4. ADN HUMANO (*amarillo*), clonado en un cromosoma artificial de levadura; se localiza en una mancha próxima al telómero del brazo largo de cada copia del cromosoma 7 de una célula humana en metafase. Podemos ya determinar la ubicación de marcadores genéticos en el cromosoma 7 midiendo su distancia al ADN localizado "in situ". (Las esferas que aparecen en la microfotografía corresponden a núcleos de otras células.)



5. El ADN SE VA ACORTANDO conforme se va replicando (*izquierda*). Cuando las cadenas parentales apareadas (*a*) se separan (*b*), se les unen los cebadores de ARN; permiten éstos que las polimerasas sinteticen las cadenas hijas. Extraídos los cebadores (*c*), una polimerasa une los fragmentos de ADN recién sintetizados (*d*), pero no puede rellenar los espacios ("gaps") correspondientes a los extremos (los telómeros). La enzima telomerasa podría ser la encargada de contrarrestar tal acortamiento. De acuerdo con cierta hipótesis (*derecha*), el segmento telomérico 3′ de cada cadena parental, que se proyecta más allá del extremo opuesto 5′ y está probablemente curvado (*e*), se despliega durante la replicación (*f*). (Sólo se muestra un extremo 3′ terminal.) Se produciría luego la síntesis normal dependiente de los cebadores de ARN. Los espacios 5′ se mantienen (*g*), pero la telomerasa, que en los seres humanos incluye a un ARN complementario a *TTAGGG*, añade unidades teloméricas a los nuevos extremos 3′. Finalmente, los extremos vuelven a curvarse (*h*), rematando al ADN ("capping").

de ADN midiendo su distancia precisa al telómero.

Los estudios de los CAL que contienen ADN adyacente al telómero están desentrañando la función que cumple ese material subtelomérico. Cabe suponer que se trata de regiones peligrosas para los genes y que habrán de contener muy pocos, ya que, si por alguna razón el telómero se escindiera, los genes situados en esta zona serían los primeros en ser eliminados. La verdad es que la mayoría de organismos unicelulares poseen ADN no codificador en las regiones próximas al telómero, seguramente para que sirva de tampón entre el telómero y las regiones codificadoras de proteínas.

Por lo que se ve, los cromosomas humanos adoptan una estrategia similar. Muchos de los fragmentos que se han examinado en los CAL son reminiscentes de ese ADN "espaciador". Lo mismo que las regiones subteloméricas de los organismos unicelulares, contienen también muchas secuencias repetidas. Además, en contraste con el ADN telomérico, el número y la secuencia de las unidades repetitivas varían de forma notable de un cromosoma a otro e incluso entre individuos.

La investigación consagrada al ADN subtelomérico podría sacar a la luz nuevos marcadores de ADN asociados con genes causantes de enfermedades, amén de contribuir a revelar la identidad y ubicación de los contados genes que se instalan en los aledaños del telómero. Sirva de ejemplo el gen responsable de la enfermedad de Huntington, una degeneración programada de neuronas específicas, que se ha cartografiado en una región próxima al extremo del brazo corto del cromosoma 4. La ciencia se había mostrado incapaz de acotar su lugar exacto, al no disponer de un ADN marcador que delimitara al gen en el extremo telomérico. Parte de esta dificultad residía en que se ignoraba dónde terminaba el cromosoma. Con la identificación del telómero humano, la investigación de la base física de esta enfermedad tiene ya una cota definida: el gen debe localizarse en los dos últimos millones de nucleótidos del cromosoma, nucleótidos que pueden ser ahora examinados para caracterizar marcadores y, en definitiva, el propio gen.

Por último, la clonación del telómero humano permite profundizar en una línea de investigación diferente: los estudios de las causas del envejecimiento celular. Se ha propuesto la hipótesis según la cual únicamente las células germinales contienen los mecanismos para evitar el acortamiento de los cromosomas durante la replicación, con el corolario complementario de que las células somáticas no reproductoras perderían las subunidades teloméricas en el proceso de división. Cuando la mayor parte o la totalidad del telómero ha desaparecido, los cromosomas se degradan y las células mueren. La identificación del telómero humano permitirá comprobar en el laboratorio la validez de esa explicación teórica.

Aunque el aislamiento del telómero humano facilite ya el avance de muchas líneas de investigación, quedan cuestiones pendientes relativas al comportamiento de dicha estructura; en particular, el mecanismo mediante el cual ese segmento de ADN estabiliza el cromosoma e impide su acortamiento durante la replicación.

Cierta respuesta parcial al problema de la replicación nos viene sugerida a raíz de varios descubrimientos. Se sabe, por ejemplo, que los extremos de muchos telómeros no poseen la estructura en doble hélice, sino que la cadena rica en *G* se prolonga allende la cadena complementaria rica en *C*. Greg B. Morin, de Yale, ha obtenido pruebas, en células cancerosas humanas, de la agregación de unidades *TTAGGG* al extremo monofilar por parte de una enzima peculiar, la telomerasa. Esta actividad recuerda la ejercida por la primera telomerasa conocida, que fue descubierta en *T. thermophila* por Blackburn y Carol W. Grieder, adscrita hoy al Laboratorio de Cold Spring Harbor.

A diferencia de la enzima humana, la telomerasa de *T. thermophila* sí se ha estudiado de manera exhaustiva. Sabemos, así, que contiene, además de aminoácidos, ARN, un pariente próximo del ADN. (En el ARN, generalmente monofilar, la timina se substituye por uracilo.) El ARN de la enzima incluye la secuencia complementaria de la cadena rica en *G* de la subunidad telomérica de *T. thermophila*: *TTGGGG*. El híbrido proteína-ARN se alinea con el extremo monofilar del telómero, de manera que el segmento de ARN se extiende por delante mismo del grupo terminal *TTGGGG*. En esa situación sirve de molde para atraer nucleótidos complementarios, que se van incorporando en el extremo de la prolongación monofilar en forma de grupos *TTGGGG*.

La telomerasa humana podría añadir unidades *TTAGGG* al ADN humano mediante un mecanismo similar. Se han propuesto varias vías de explicación sobre cómo estas unidades adicionales evitarían que los cromosomas se acortasen durante la replicación. Ninguna ha recibido todavía respaldo experimental. Nosotros ofrecemos en la figura 5 uno de esos mecanismos hipotéticos.

La respuesta a la cuestión del remate ("capping") es igualmente incompleta. Podría, sin embargo, tener que ver con el hecho de que todas las secuencias teloméricas conocidas pueden formar estructuras poco usuales. Por ejemplo, las bases de guanina de una de las cadenas de ADN se aparean con guaninas de la misma cadena, aunque en los genes la guanina siempre se enlaza con la citosina, nunca consigo misma. Esta conformación insólita podría impedir la unión de las enzimas que degradan el ADN sin telómeros.

Independientemente de estas cuestiones sin resolver, la demostración de que la secuencia $(TTAGGG)_n$ es el telómero humano ha dado credibilidad a nuestra hipótesis original: las secuencias repetitivas no implicadas de forma directa en la síntesis de proteínas almacenan información crítica para la supervivencia y función de los cromosomas. Las próximas metas a conseguir serán identificar otras secuencias de importancia pareja y averiguar el medio a través del cual esas secuencias y la *TTAGGG* envían sus mensajes a la célula.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A HIGHLY CONSERVED REPETITIVE DNA SEQUENCE, $(TTAGGG)_n$, PRESENT AT THE TELOMERES OF HUMAN CHROMOSOMES. Robert K. Moyzis, Judy M. Buckingham, L. Scott Cram, Maria Dani, Larry L. Deaver, Myrna D. Jones, Julianne Meyne, Robert L. Ratliff y Jung-Rung Wu en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 85 número 18, págs. 6622-6626; 1988.

CLONING HUMAN TELOMERIC DNA FRAGMENTS INTO *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* USING A YEAST-ARTIFICIAL-CHROMOSOME VECTOR. Harold C. Riethman, Robert K. Moyzis, Julianne Meyne, David T. Burke y Maynard V. Olson en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 86, n.º 16, págs. 6240-6244; agosto de 1989.

STRUCTURE AND FUNCTION OF TELOMERES. Virginia A. Zakian en *Annual Review of Genetics*, vol. 23, págs. 579-604; 1989.

Ciencia y sociedad

Lengua y epigrafía ibéricas

El comienzo de la investigación histórica sobre los alfabetos ibéricos vino de la mano de los numísmatas, interesados en conocer las leyendas de las acuñaciones indígenas. Así, la primera mención de una moneda ibérica es la de Fulvio Ursino, a la que siguió la obra de Antonio Agustín, obispo de Tarragona, ilustre erudito aragonés, quien en su *Diálogo de medallas, inscripciones y otras antigüedades* (1587) hizo importantes consideraciones sobre las monedas escritas en la "lengua antigua española", identificando los signos E y N en una moneda bilingüe de Ampurias, pero absteniéndose de ulteriores comentarios.

Vicencio Juan de Lastanosa publicó en 1645 un *Museo de las medallas desconocidas españolas*, que contenía tres discursos de Pablo de Rojas, Francisco Ximénez de Urrea y Juan Francisco Andrés de Uztárroz, respectivamente, que, si bien no progresaron en el desciframiento, identificaron algunas cecas. Da un paso, a mediados del siglo XVIII, L. J. Velázquez, al deslindar los alfabetos "celtíbero" (oriental), turdetano y bástulo-fenicio. Más avanzada la centuria, F. Pérez Bayer consiguió notables aciertos en la identificación de varias cecas, pero escribió poco, y varios de sus descubrimientos quedaron inéditos.

Se asiste a un renovado interés por las monedas y signos ibéricos en el siglo pasado. Del tema se ocuparon, entre otros, D. Sestini, Ch. Lenormant, C.L. Grotefend, F. de Saulcy, G.D. Lorichs y P.A. Boudard.

Paralelamente a estas investigaciones, los eruditos vascos venían manteniendo desde el siglo XVI que el vasco era la antigua lengua española, y aportaron algunas pruebas en tal sentido Garibay y sobre todo M. Larramendi, autor éste de *De la antigüedad y universalidad del vascuence en España* (1728), quien mantuvo que no sólo era el vasco tal lengua antigua, sino que el mismo latín tenía palabras vascas (la realidad era exactamente a la inversa). Fue seguido por J.A. Moguel y P.P.Astarloa, cuya *Apología de la lengua vascongada*, publicada en 1803, habría de granjearle un gran predicamento. Las opiniones de Larramendi también tuvieron éxito entre sus compañeros jesuitas, que informaron a Hervás y Panduro, quien las incluyó en su obra, y, a través de Moguel y Hervás, llegaron a Humboldt; en sus *Investigaciones*, éste se atribuyó la gloria de haber descubierto que el vasco era la antigua lengua hablada en España, representando una antigua capa lingüística que habría influido también en el celta y el latín.

La aportación fundamental al desciframiento de la escritura se debe en esta época al numísmata Antonio Delgado. Propuso en su *Nuevo método de clasificación de las medallas autónomas de España* (Sevilla, 1871) una lectura de las inscripciones que, mejorada por Zöbel de Zangroniz, constituirá la base de la lectura de inscripciones hasta el desciframiento definitivo. Ambos numísmatas harán apreciaciones muy válidas, todavía vigentes. Se suman luego a la investigación Rodríguez de Berlanga y Pujol y Camps. E. Hübner reúne en sus *Monumenta linguae ibericae* (1893) todas las inscripciones conocidas.

Entrados ya en nuestro siglo, el investigador austríaco Hugo Schuchardt publica dos trabajos de resonancia: *Iberische Deklination* (1907), basado en las monedas, y el estudio antroponímico *Iberische Personnamen*, basado en el bronce de Ascoli, tabla de concesión de la ciudadanía a caballeros ibéricos hallada en esta localidad italiana en 1908.

Desconfiando de las lecturas suministradas por la epigrafía, Ramón Menéndez Pidal se dedicó, por su parte, a los estudios toponímicos. Su mejor contribución es también la primera, pues en 1919 desveló la existencia en el Pirineo central de una serie de voces toponímicas vascas que demostraban la supervivencia en esta zona del vasco hasta la Alta Edad Media; estudios ampliados posteriormente por Corominas, Alvar, Guiter, Ravier y otros. Se da la circunstancia de que esta zona del Pirineo oscense y leridano fue hogar, precisamente, de diversas tribus ibéricas.

El problema fundamental seguía siendo la incapacidad para leer correctamente los letreros ibéricos. En 1921 apareció el plomo de La Serreta I en alfabeto jónico, comentado en 1922 por M. Gómez Moreno, quien, en 1925, presentaba el desciframiento definitivo del alfabeto ibérico oriental, basándose en una idea hasta entonces no considerada: que la escritura no era alfabética, sino sistemáticamente semisilábica.

Pero el descubrimiento de Gómez Moreno pasó sin pena ni gloria, únicamente aprovechado por Ferrandis, catedrático en la Universidad Central, y por el inglés George Hill. Sí le sacó partido en Valencia Pío Beltrán Villagrasa, quien con él leyó e identificó las cecas y los letreros que aparecían en gran número en las excavaciones de Liria.

Una publicación de Pío Beltrán, en la que traducía un letrero de Liria por el vasco como "grito de guerra", es, precisamente, el punto de partida sobre la polémica del vascoiberismo. Los filólogos vascos, antaño defensores de la iberidad de su pueblo, habían cambiado de opinión a fines del siglo XIX. Julio de Urquijo replicó a Beltrán Villagrasa, sugiriendo un error de lectura o fecha en la inscripción. Contrarreplicó Beltrán con nuevos argumentos, y fue añadiendo otras traducciones, ya no tan felices. Tovar, cuyo prestigio entre los filólogos españoles era considerable, tomó decidido partido en contra de las tesis vascoiberistas en un artículo publicado en 1954, y en años posteriores se definirán en el mismo sentido Michelena y sus numerosos discípulos, como Gorrochategui, Echenique, De Hoz. Por su lado, J. Untermann consideraba que el vasco no ayudaba en nada a la interpretación del ibérico, siendo ésta la opinión que ha prevalecido hasta nuestros días.

No obstante, a principios de los años cuarenta, Gómez Moreno publica la justificación de sus tesis y se produce una floración de estudios: Caro Baroja y Tovar delimitan el área de habla ibérica y la de habla céltica, labor continuada después por Untermann con sus *Elementos para un Atlas Antroponímico de la Hispania Antigua* (1965). Gómez Moreno da a luz sus *Misceláneas*, cuyo "Suplemento de epigrafía ibérica" pone a disposición de los estudiosos calcos y transcripciones de los textos conocidos hasta el momento. Otra fecha a anotar es 1955, cuando J. Jannoray publica *Ensérune, contribution à l'étude des civilizations préromaines de la Gaule méridionale*, enriquecida con numerosos grafitos. La lectura de las inscripciones permite afirmar, ya sin género de dudas, que el ibérico no es una lengua indoeuropea.

Los años cincuenta ven una serie de trabajos, poco relevantes, de Caro Baroja, Tovar, Vallejo, Michelena o Antonio Beltrán. Domingo Fletcher publica las inscripciones del Museo de Prehistoria de Valencia en 1953. La década siguiente se inicia con la pu-

blicación de la *Enciclopedia Lingüística Hispánica*, libro que reúne artículos de gran interés sobre las lenguas prerromanas de Tovar, Palomar Lapesa, Hubschmid y Menéndez Pidal, que defienden la "teoría del substrato", según la cual una vasta capa lingüística se extendía por el Mediterráneo en épocas prehistóricas, hipótesis carente de respaldo arqueológico.

Quedaba por resolver el problema del semisilabario meridional o tartésico. Gómez Moreno y Schmoll se ocuparon del tema sin llegar a solucionarlo. Tovar, en Salamanca, promueve la creación de un fichero antroponímico, de donde saldrán una serie de trabajos de Palomar Lapesa, sobre la antroponimia lusitana, y de M.ª Lourdes Albertos, que inicia su carrera investigadora en el área indoeuropea con la publicación de su tesis doctoral (1966).

Lo más destacado del período es la aparición de nuevos estudiosos, fundamentalmente Fletcher, que desde Valencia publica numerosos e interesantes textos ibéricos, y Untermann, de Colonia, que emprende la tarea de editar un fenomenal catálogo de los materiales lingüísticos prerromanos, los *Monumenta Linguarum Hispanicarum*, de los que se han publicado el tomo I, dedicado a las monedas, el II, dedicado al Sur de Francia, y el III, que trata del área ibérica peninsular. Fletcher y Untermann polarizan desde entonces la investigación sobre la lengua ibérica.

Antes de la obra de Untermann, J. Maluquer de Motes publicaba su *Epigrafía prelatina de la Península Ibérica* (1968), que se convierte en el manual de uso que reemplaza a las *Misceláneas* de Gómez Moreno.



1. LIRIA LXXVI. Vaso ibérico del cerro de San Miguel, de Liria, Valencia. En la parte inferior, inscripción pintada de la tapa, en semisilabario levantino.

Los años setenta registran una transformación importante. La aparición de nuevos textos revitaliza el interés por la disciplina, pero incide sobre todo la aparición del bronce de Botorrita en 1974, a consecuencia del cual se celebra el I Congreso sobre Lenguas y Culturas Prerromanas de la Península Ibérica, que tiene lugar en Salamanca, y cuyas actas se publican en 1976.

Desde entonces se han sucedido estos congresos, que son una oportunidad de reunir y difundir las investigaciones realizadas. El II Congreso se reunió en Tubinga, Alemania, en 1976; el III en Lisboa en 1980; el IV tuvo lugar en Vitoria en 1985, y el V en 1989 en Colonia. El balance de estos congresos es desigual, evidenciando un estancamiento en los estudios referentes a la lengua ibérica. No así en lo que se refiere a las lenguas indoeuropeas, pues Tovar presenta su desciframiento de la inscripción lusitana de Lamas de Moledo, que evidencia a la vez que el lusitano representa una capa arcaica del céltico, separándose en puntos significativos del celtíbero, en el que está escrito el bronce de Botorrita. Otras contribuciones importantes se deben a Jaime Siles, Untermann, Albertos y Schmidt. A mediados de los ochenta, sin embargo, desaparecen Tovar, Albertos y Michelena.

El estado actual es desigual: se ha avanzado mucho en el conocimiento de las lenguas indoeuropeas habladas en la Península, mientras el semisilabario meridional se resiste a los intentos de transcripción, si bien Fletcher ha ofrecido un desciframiento que ha podido comprobarse como cierto, a falta de la enigmática ausencia del signo BA en este semisilabario, y uno de los autores (Luis Silgo) ha extendido tal desciframiento a las inscripciones del Algarve. En lo que respecta al ibérico, aparte de la publicación de nuevos textos y la aparición, en 1985, del *Léxico de inscripciones ibéricas*, de Jaime Siles, la situación se resumía en la frase siguiente de éste: "Tanto uno como otro se nos presentan —como objeto— bajo un prisma de identidad común: el de nuestra ignorancia. Esto, que parece para no dicho, es, curiosamente, todo (o mejor, lo poco) que se puede decir... lo que sabemos sobre la naturaleza y el sistema de la lengua es bien poco: tan poco que no sobrepasa la mayor parte de las veces el umbral de la mera especulación."

Por su parte, Tovar concluía su discurso de homenaje a Fletcher en 1984 con estas palabras: "Terminaré expresando nuestra esperanza y nuestro deseo de que nuestros compañeros y discípulos puedan, ahora que dispo-

nen de materiales más abundantes, como entonces no nos atrevíamos a soñar, avanzar en el conocimiento del enigma, que nosotros dejamos no resuelto, mientras tal vez sonríe la esfinge ibérica."

Sin embargo, la investigación en los últimos años no se ha conformado con tan pesimistas perspectivas. Lo fundamental es que se ha renunciado a los intentos de traducir directamente los plomos y la lengua ha empezado a ser estudiada por sí misma, única actitud desde la que es posible proceder a una auténtica filología del ibérico, pese a que no hará falta exagerar las dificultades de estudio que ofrece una lengua desconocida, sin textos bilingües ni relaciones firmemente establecidas. Así, Fletcher ha dedicado una serie de trabajos monográficos a palabras ibéricas, y Untermann ha publicado sendos trabajos tratando de aproximarse a la gramática que ofrecen plomos y lápidas. Ultimamente se han dado una serie de pasos que permiten establecer una gavilla de relaciones del ibérico sorprendente para lo que existía hace pocos años, habiéndose conseguido traducir algunos textos cortos gracias a un sucinto vocabulario que parece seguro. La traducción de textos largos sigue siendo imposible, pero los escasos avances realizados hacen abrigar esperanzas de que algún día será posible interpretarlos algo mejor. Daremos aquí algunas conclusiones de la investigación que han venido realizando conjuntamente Fletcher y uno de los autores (Silgo).

Por lo que respecta a la *epigrafía*, se conocen unos 1500 textos ibéricos. Son grafitos sobre cerámica, inscripciones en lápidas, documentos en láminas de plomo (uno de bronce), inscripciones rupestres, grafitos en fusayolas, punzones, tejas, ánforas, etc. La mayoría son muy breves, y llevan únicamente el nombre del propietario, a veces difícil de leer.

La lengua ibérica se ha anotado en cuatro sistemas distintos de escritura: en el semisilabario llamado oriental o "ibérico", en el semisilabario meridional o "tartésico" y en el alfabeto jónico del Sureste. Por último, hay nombres ibéricos escritos en inscripciones latinas, la más famosa de las cuales es el "bronce de Ascoli", donde figura una nómina de caballeros iberos que recibieron la ciudadanía romana.

El alfabeto jónico es de origen griego, levemente modificado, y fue utilizado en las provincias de Alicante-Murcia durante los siglos IV-III a.C.

Los semisilabarios oriental y meridional tienen la misma estructura, pero ofrecen diferencias en la forma de algunos signos, por lo que el desciframiento del segundo es difícil. No obstante, el desciframiento de Fletcher soluciona convincentemente la lectura de la mayoría de las inscripciones, quedando la duda del signo BA, que no aparece por ninguna parte.

Hay cinco signos vocálicos (A, E, I, O, U), siete consonánticos (L, M, N, R, RR, S, TS), una semivocal (W, el signo que se escribe Y, sobre el que hay muchas dudas), nueve signos semisilábicos, en la serie de las oclusivas (BA, BE, BI, BO, BU; KA/GA, KE/GE, KI/GI, KO/GO, KU/GU; DA/TA, DE/TE, DI/TI, DO/TO, DU/TU).

Puede verse que hay dos clases de R y dos de S. Se dudaba sobre la clase de vibrantes y sibilantes que cada una representaba, pero hoy Silgo ha dilucidado la cuestión en un capítulo de su tesis doctoral inédita.

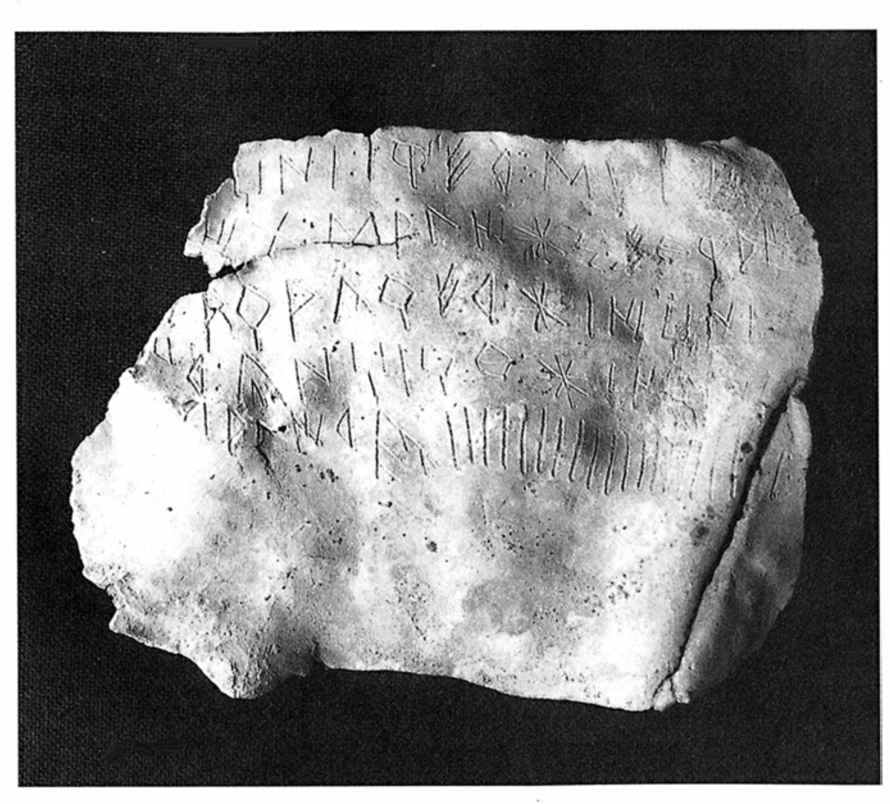
La escritura ibérica, por tanto, carece de H, Ñ, P (que sólo aparece como variante de B); además, no distingue las sordas de las sonoras en la serie de las oclusivas, lo que es una dificultad adicional de interpretación.

El semisilabario oriental se escribe de izquierda a derecha y el meridional de derecha a izquierda; sin embargo, el plomo ibérico de la Penya del Moro (Sant Just d'Esvern) está en semisilabario oriental y se escribe, no obstante, de derecha a izquierda.

Hay que tener en cuenta que el semisilabario oriental fue utilizado por los celtíberos para escribir su propia lengua, y que las inscripciones llamadas "tartesias" del Sur de Portugal y Baja Andalucía, aunque se sirvan del semisilabario meridional, anotan una lengua que no es en absoluto ibérica y que no parece tampoco indoeuropea. El semisilabario llamado "del Algarve" no es sino una variante del meridional, que anota los mismos sonidos.

Con respecto a su origen hay discrepancias: para los primeros investigadores era fenicio; Gómez Moreno pensó en un semisilabario llegado del Egeo en tiempos antiquísimos; posteriormente se han formulado diversos pareceres. En opinión de Fletcher, que tiende a imponerse, es una creación autóctona a partir de diversos materiales de las escrituras utilizadas en su tiempo.

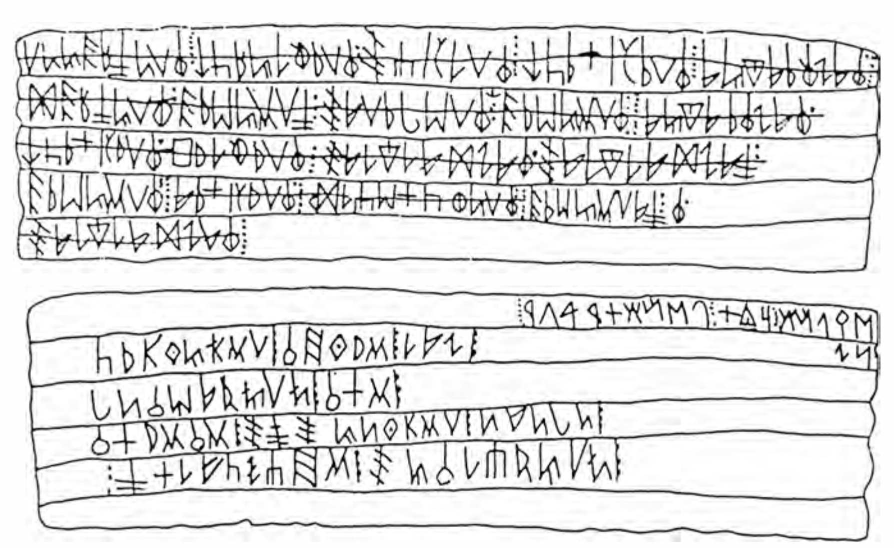
Respecto a su cronología, las estelas del Algarve se datan en el siglo V a.C., si bien la mayoría carecen de contexto, y a la misma fecha pertenecen algunos grafitos de Ampurias y el Sur de Francia, por lo que los dos sistemas surgen coetáneos en áreas muy alejadas y se desarrollan también paralelamente en el tiempo. Sólo en Alicante el signario oriental parece imponerse al meridional y jónico hacia el siglo III a.C. El final del signario oriental puede seguirse en varias fechas: hacia el 48 a.C. cesan las emisiones de monedas con leyendas ibé-



2. LOS VILLARES, V, B. Plomo ibérico escrito en semisilabario levantino.

ricas; de poco después datan ciertas lápidas de Sagunto, Castellón y Ampurias. Muy tardías pueden considerarse la lápida de Sinarcas y otras de Tarragona; finalmente, los últimos documentos son unos pocos grafitos en *terra sigillata,* con lo que puede afirmarse que hacia el cambio de era se produce la extinción del semisilabario. No así la de la lengua, que parece perdurar todavía en lugares del interior. Indiquemos por último que algunas ciudades andaluzas fuertemente semitizadas acuñaron monedas en escritura púnica tardía, el llamado "libio-fenicio".

Por lo que concierne a la *lengua*, tenemos el siguiente inventario fonético: vocales (a, e, i, o, u), semivocales (w), vibrantes (r, ŕ o rr), sibilantes (s, ś o ts), laterales (l), nasales (n, m), oclusivas sordas (p, t, k), oclusivas sonoras (b, d, g).



3. LA BASTIDA DE LES ALCUSES, en Mogente. Plomo ibérico escrito en semisilabario meridional.

No obstante, el sistema parece algo más complicado, ya que las alternancias de a/e (en el mismo documento) y de o/u parecen indicar mejor un sistema de siete vocales reales. Algunos nombres ibéricos escritos en latín ofrecen aspiración, y tal vez haya matices en la realización de las sibilantes. Igualmente se dan casos de geminación ll y nn.

Fonéticamente, el ibero ofrece unos rasgos próximos al vasco: ausencia de P como fonema distintivo, rechazo a los grupos consonánticos cl-, tr-, dr-, cr-, gr-, gl-, tl-, dl- (lo que se llama *muta cum liquida*), rechazo a R inicial, que exige una E delante, escasez de nasales en posición intervocálica, presencia meramente testimonial de la M, reducción del grupo -ld- a -l- y -mb- a -m-.

En cuanto a gramática general, puede afirmarse que el ibérico no es una lengua flexiva y no es, por tanto, indoeuropea. Es una lengua aglutinante en que derivación, declinación y los diversos fenómenos gramaticales se forman mediante sufijos que se añaden al tema, siendo los prefijos muy escasos y específicos, circunstancia que también ocurre en vasco.

En composición, el adjetivo sigue al substantivo: "toro-negro", pero en composición de dos substantivos el determinado precede al determinante. Este fenómeno, adelantado por Schuchardt, fue confirmado por Pattison, quien ha indicado que lo mismo ocurre en vasco: "etxe-zuri, "casa-blanca", y "etxe-jaun", "señor de la casa"; en ibérico tenemos "Calun seldar", que significa "tumba de Calun", exactamente como en vasco.

En cuanto al orden de la frase, el verbo sigue al sujeto: "Ildutaś ebanen" = "Ildutaś curó de hacerlo", parece tratarse de un tipo de lengua SOV (sujeto-objeto-verbo). El vasco es también una lengua SOV.

El ibérico, igual que el vasco, tiene tendencia a usar palabras bisilábicas, siendo los ejemplos tan abundantes que puede afirmarse que en inscripciones con léxicos sin paralelos lo más prudente es proceder a dividir las palabras por pares de sílabas.

La derivación se efectúa por sufijos. Ibérico y vasco antiguo y el "protovasco", sólo conocido por escasas inscripciones de la Aquitania, coinciden en la forma y sonido de tales sufijos: *-kin*, *-no*, *-ets*, *-co*, *- con*, *-taŕ*.

Por lo que respecta a la declinación, uno de nosotros ha establecido que el ibérico no marca el nominativo, situación que se supone sucedía en protovasco; y hay tres sufijos concurrentes de genitivo: *-ar*, *-wi*, *-en*, el último de los cuales es también vasco. El genitivo plural ibérico *-sken* es el mismo vasco *-ken*. Finalmente, el ibérico tiene un sufijo *-e* que en nuestra opinión es el mismo que aparece en inscripciones aquitanas como dativo, y que equivale al dativo vasco *-i*.

La lengua ibérica ofrece otros sufijos casuales, como *-gate*, *-te*, *-ike*, *- ŕen*, que uno de nosotros compara con los vascos *-gatik*, *-tik*, *-ik*, *-aŕen*, si bien con dudas.

Por último, Untermann describe el sufijo *-ka,* que supone que tiene la misma función que el activo vasco *-k*.

Si ibérico y vasco presentan afinidades en cuanto a fonética y gramática, no sucede lo mismo con el vocabulario, que ofrece muy pocas equivalencias seguras. Las causas son diversas, pero hay que considerar el cambio que cualquier lengua experimenta en el curso de dos mil años y la inundación de préstamos latinos y romances que padece el vasco actual. Precisamente en los documentos ibéricos extensos los investigadores esperamos encontrar una clase de léxico: religioso, comercial, técnico, que en vasco ha sido reemplazado totalmente por préstamos romances y latinos.

No obstante, cuando los paralelos aparecen, son sorprendentes: "Iliberri", nombre que llevaron las ciudades ibéricas de Granada, Elne y Lumbier, es el mismo compuesto "iri" (ciudad) y "berri" (nueva) que llevan muchas villas vascas. Otras palabras como "aŕs" (oso), "beleś" (negro), "gudu" (guerra), han llegado casi iguales hasta nuestros días.

Estos avances obtenidos en lo que respecta a la composición de la lengua ibérica hacen esperar que nuevas, rigurosas, prolongadas e intensas investigaciones puedan desvelar nuevos aspectos parciales del ibérico, objetivo que parece modesto, pero que, teniendo en cuenta la dificultad que presenta el tema, no lo es en absoluto. (Luis Silgo Gauche y Margarita Garin.)

Proyecto Cavoli

Hace unos meses, en 1990, se inició en aguas italianas de Cerdeña un proyecto de arqueología subacuática centrado en la localización, estudio y recuperación de los restos de una nave medieval española, naufragada en aquellas aguas mediterráneas.

El sorprendente hallazgo se realizó en el extremo sur de Cerdeña, en la isla de Cavoli, junto a Villasimius, sobre las informaciones de buceadores e investigadores británicos e italianos que habían recuperado algunos materiales procedentes de unos naufragios en aquella zona con anterioridad



4. CASCO, preparado para su extracción.

aunque con identificación incompleta de los mismos.

La operación se preparó en colaboración con las autoridades italianas de Bienes Culturales, facilitando la presencia de un amplio equipo pluridisciplinar de investigadores bajo mi dirección, con la intención de recuperar en una campaña de tipo medio la información y material suficiente como para disponer de una idea clara de las circunstancias del naufragio y cronología, así como de la identidad de la nave, características técnicas de la misma, cargamento y derrotero recorrido hasta el momento del hundimiento, así como posible puerto de destino.

Se llevó a cabo una expedición de tipo clásico transportando desde España todo el material a bordo del remolcador de altura *Alonso de Chaves* e instalando en Cerdeña una base de trabajo doble. Por un lado, en el propio islote de Cavoli se dispuso el campamento de trabajo con las instalaciones mecánicas, embarcaciones, plataformas flotantes para los equipos de succión y bombeo, equipos de carga de aire para los equipos autónomos, instalaciones para el material de trabajo, equipo médico, instalaciones ligeras para conservación y tratamiento del material a extraer, así como la infraestructura mínima requerida para vivir sobre el terreno y disponer de los enlaces por radio con la base en tierra firme en Villasimius.

Este campo de trabajo se completó con la necesaria infraestructura de evacuación ante posibles incidentes o accidentes por medio de helicóptero o por mar con embarcación rápida.

En la base de tierra firme, en Villasimius, se instalaron los elementos fijos como equipos informáticos, laboratorio fotográfico, dibujo, topografía y laboratorio de campaña con el personal adecuado en cada caso.

La excavación se planteó con una prospección previa de la zona tendente al estudio medioambiental, de régimen de corrientes, vientos, geología, así como para intentar localizar otros naufragios o partes relevantes del que se iba a estudiar.

Los restos hallados fueron localizados a una profundidad de entre 14 y 18 metros, cómoda para los trabajos arqueológicos, pero con el inconveniente de ser excesivamente escasa para una conservación adecuada de los restos, toda vez que la fuerza del mar los habría destrozado casi por completo, como pudimos comprobar.

La dinámica marina en Cabo Carbonara, con la influencia de los vientos grecal y mistral, produce corrientes de oleaje suficiente como para provocar el hundimiento rápido de las embarcaciones antiguas y aun modernas que tienen la mala fortuna de acercarse mucho a tierra. Por otra parte, una vez hundidas las embarcaciones, como en este caso, la destrucción es muy rápida en cascos de madera, ya que la fuerza mecánica se incrementa con el batir en fondos rocosos erizados de escollos. El bivalvo *Teredo navalis* culmina la destrucción de la madera.

La aparición de una estructura de madera, así como, piezas de artillería de hierro y restos de cargamento, cerámica constructiva y de mesa, carga general y munición para la artillería, facilitó la información necesaria para poder determinar con seguridad no sólo el momento del hundimiento sino también las características trágicas del mismo, y poder de esta manera reconstruir un poco la historia. Una mala estiba del cargamento sumada a la fuerza del mar serían suficientes.

La falta de organización en la distribución sobre el fondo de las piezas de artillería, ahora en fase de tratamiento para su recuperación, obliga a pensar no en una nave armada sino en una carga de cañones que viajaban como mercancía. La falta de otras piezas secundarias de los mismos, como restos de cureñas, aboga en tal dirección. Se trata de piezas de varios calibres, desde piezas pequeñas a grandes cañones de tres metros que deben corresponder a artillería de tierra o sitio.

Técnicamente son piezas de hierro realizadas a forja con refuerzos anulares también de hierro. Su calibre podrá determinarse cuando finalice el proceso de tratamiento y conservación.

El trabajo de excavación se realizó con elementos técnicos y mecánicos, cuadrícula de PVC, detectores magnéticos, herramientas neumáticas ligeras, estudio geológico y biológico de la zona, así como recuperando una completa información documental tanto en soporte fílmico, 16 mm, como magnético por vídeo. La fotogrametría procesada de inmediato por barrido y tratamiento informático permitió acelerar el proceso de documentación y, por tanto, aligerar los trabajos de excavación.

Los materiales aparecieron en diversos puntos con concentraciones que hablaban un poco del tipo de naufragio y del cargamento que contenía. Una de las zonas evidenciaba el punto donde seguramente chocó el barco ya que se halló un ancla de hierro, así como restos de la carga más pesada, que pudo estar situada en cubierta por su gran volumen. A un centenar de metros al oeste del primer punto, una gran concentración de cerámica indicó el lugar donde fue a reposar una parte de la nave destrozándose definitivamente. Una parte de la estructura de madera se recuperó bajo dos metros de algas que la habían preservado, aunque muy atacada por los xilófagos.

Pudimos determinar que el barco, una nave de madera del siglo XV, se había encontrado con serias dificultades por condiciones climatológicas adversas que le impidieron resguardarse en la costa, yendo a dar contra las rocas de los acantilados, produciéndose el naufragio y la pérdida de hombres y cargamento.

Muy poco puede precisarse aún del tipo de nave, ya que los restos de estructura son escasos. Ahora bien, por el grosor de la tablazón del forro, así como por las cuadernas reforzadas, estimamos que se trata de un navío mercante, tal vez una nao, muy frecuentes en aguas mediterráneas en

aquella época con finalidad comercial, capaces de cargas voluminosas. Es el tipo de nave mercante por excelencia con alto bordo y propulsión exclusivamente a vela, al principio con velas latinas y después con velas redondas, castillo, alcanzar y toldilla en el siglo XV.

Por el estudio de los materiales se ha logrado determinar que el barco pertenecía a la Corona de Aragón y había partido del puerto de Valencia seguramente, con destino a Palermo, y habría tocado en Mallorca y Cerdeña. La carga era de artillería, cerámica de Manises, tanto cerámica constructiva decorada con reflejo azul como vajilla de mesa de reflejo metálico con decoraciones de bryonia. Entre las formas, albarelos, platos, fuentes, jarrones, escudillas y tazas, además de carga general, e iba consignada en parte a una familia noble palermitana, la de los Becadelli, produciéndose el naufragio hacia mediados del siglo XV.

El cargamento y su análisis permiten sugerir que la carga de artillería, constituida por piezas de diversos calibres, así como munición, fabricada por algunos de los maestros herreros valencianos o catalanes, iba consignada con destino a las guerras de Italia entre el rey de Aragón, Alfonso V el Magnánimo, y los estados italianos. Seguramente había de ser montada en el reino de Nápoles en sus emplazamientos definitivos. La cerámica en parte estaba constituida por azulejos y baldosines correspondientes a la decoración de pavimentos o muros, con representación de las armas de la aludida familia Becadelli. El resto de la carga de tipo general, cerámica, presumiblemente tejidos y otros.

La arqueología en esta ocasión ha permitido un acercamiento riguroso a un hecho histórico que callan los documentos escritos. (M. Martín-Bueno, catedrático de la Universidad de Zaragoza.)

Germinación y dormancia

El fenómeno de la germinación de las semillas puede definirse como el conjunto de procesos por medio de los cuales el embrión abandona su estado inerte, al menos en apariencia, y da lugar a una plántula que poco a poco se diferenciará en una planta adulta. Por ese fenómeno, pues, el embrión se independiza de la semilla y se constituye en nuevo vegetal.

Se conoce todavía muy mal la naturaleza de la germinación propiamente dicha. Muchos autores ven en ella varias etapas, que nosotros reducimos a tres para la mayoría de las especies: imbibición, germinación *sensu stricto* y crecimiento de la radícula. Se caracterizan por diversos procesos físicos y metabólicos que pueden ser diferentes o tener lugar con dispar intensidad, según se trate de una u otra etapa.

Estos procesos entran en acción a instancias de determinadas hormonas, que los controlan también. La única prueba evidente de que la germinación se ha efectuado es el comienzo del crecimiento del embrión, observándose numerosas elongaciones y divisiones celulares. En muchas especies, las elongaciones celulares preceden a las divisiones, como hemos observado en pinos y cereales. En otras, como el manzano, las divisiones celulares tienen lugar antes de las elongaciones.

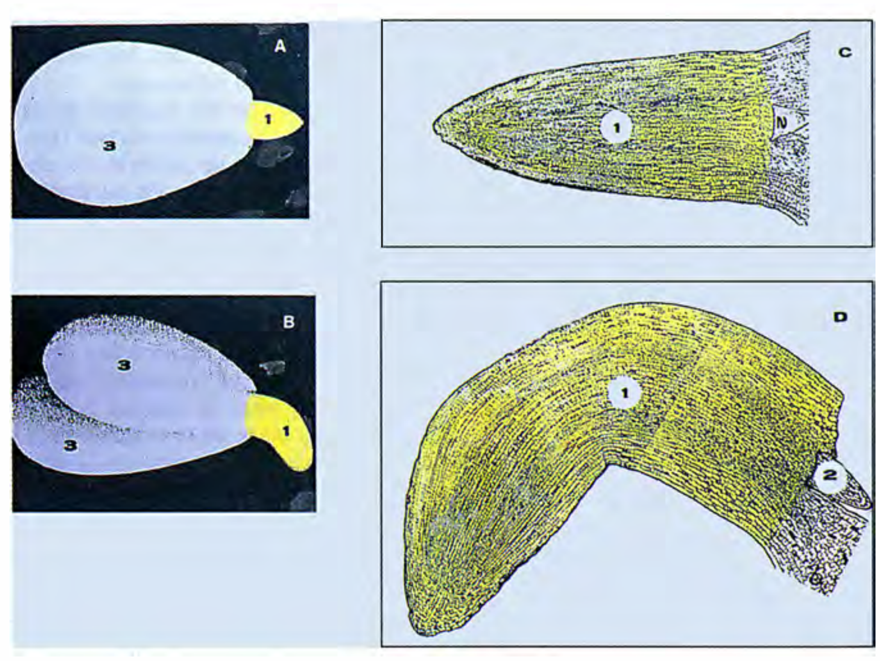
Existen muchos factores externos e internos de la semilla que fomentan o se oponen a la germinación y el posterior desarrollo de la planta. Se ha demostrado que las plantas cuya germinación tuvo lugar en condiciones favorables crecen con notables ventajas frente a plantas cuya germinación no se efectuó en las mejores circunstancias.

Pero no todas las semillas maduras, al menos aparentemente, y en presencia de condiciones favorables para germinar, son capaces de hacerlo. Esa incapacidad para germinar recibe el nombre de dormancia. La existencia de esta dormancia es uno de los "eventos sabios" de la naturaleza, ya que permite que muchas especies de semillas acometan la germinación en momentos propicios para su desarrollo.

Si la semilla tiene esta peculiaridad innata, hablaremos de una dormancia primaria; pero si se le ha inducido de alguna manera, estaremos ante un caso de dormancia secundaria.

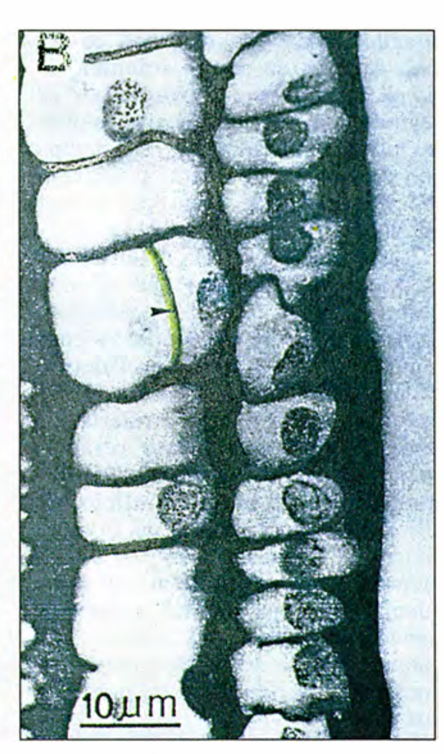
Según el factor que intervenga en la dormancia distinguiremos dos tipos de ésta: física y morfofisiológica. En la naturaleza encontramos especies que presentan uno u otro tipo, otras que tienen ambas y unas terceras cuya dormancia es de causa desconocida. Débese la dormancia física a una particularidad de las semillas; reside en cualquier parte de ésta, generalmente en sus cubiertas, que, por su estructura dura y compacta, impiden la salida del embrión. La dormancia morfofisiológica se refiere a una insuficiencia morfológica o fisiológica del embrión, o ambas. En el primer caso se trata de semillas que, aunque exteriormente presentan un aspecto semejante a la semilla madura, el embrión no ha terminado su desarrollo. Respecto a la insuficiencia fisiológica, se da en semillas cuya estructura, incluida la del embrión, está perfectamente desarrollada, si bien en alguna parte de la misma (que suele ser en el propio embrión) no existen los niveles fisiológicos adecuados de los componentes metabólicos (por ejemplo, hormonas, enzimas, etc.) que intervienen directamente en el arranque de la germinación.

Esta dormancia se elimina general-



5. EMBRIÓN DE MANZANO. (1) Radícula + hipocótilo. (3) Cotiledones. A: en el momento de ser extraído de la semilla; B: después de dos días de su puesta a germinar, observándose en este caso el crecimiento radicular; C, D: corte longitudinal (× 60) de la parte (1) de A y B respectivamente. (2) Corresponde al epicotilo, la base de los cotiledones también se aprecia en C y D.





6. *ORIENTACION ANORMAL de divisiones celulares* (indicadas por las flechas coloreadas) *en el córtex de la radícula de embriones durmientes de manzano, después de 2 o 5 días de iniciada la germinación.*

mente por factores físicos (luz, temperatura, humedad, etc.) y químicos (CO_2, O_2, algunos inhibidores del ciclo respiratorio y ciertas hormonas: las giberelinas, citoquininas, el etileno, etc.). Por lo que concierne al régimen endocrino, se ha observado que, en los embriones a los que se les ha eliminado la dormancia, los niveles de hormona inactiva ABA han aumentado, mientras que los niveles de giberelinas son inferiores.

La movilización de reservas en el embrión ha sido considerada por ciertos autores como un criterio de eliminación de dormancia. En particular la actividad de ciertas hidrolasas (lipasas y proteasas esencialmente), los grupos de pequeñas moléculas como aminoácidos y las estructuras de ciertos cuerpos de reserva, han sido estudiados durante la eliminación de la dormancia y en el transcurso de la germinación, pero no se ha podido dar una idea clara de la relación existente entre la eliminación de la dormancia y dicha movilización de reservas, característica de la germinación. Cabe decir que ambos fenómenos están muy poco claros en la mente de los estudiosos.

Por el contrario, se han podido dejar patentes algunas diferencias estructurales entre embriones "durmientes" y "no durmientes". Se observa un aumento de la materia fresca y la materia seca de los embriones "no durmientes" puestos en imbibición, que no se aprecia en embriones "durmientes"; presentan los primeros elongaciones y divisiones celulares en un número considerable, mientras que en los durmientes no se aprecian elongaciones celulares y, si existen algunas divisiones celulares, se producen en número muy reducido y generalmente de forma anormal. Se han registrado, en lo concerniente al núcleo celular, diferencias del tamaño inicial y de su evolución entre células de embriones durmientes y no durmientes puestos a germinar, siendo más pequeños los núcleos de las primeras. En embriones no durmientes, el inicio de la germinación suele ir acompañado por el aumento de núcleos que se encuentran en fase S o G_2 del ciclo celular; en los durmientes, los núcleos quedan en su mayoría bloqueados en fase G_1; en los núcleos de los no durmientes aparecen vacuolizaciones nucleolares y componentes granulares, de los que carecen los durmientes. También se han detectado diferencias en la cantidad de ARN mensajero.

La germinación y la dormancia siguen siendo objeto de múltiples estudios, ya que ambos fenómenos tienen un gran interés agronómico y económico y son la clave para poder abordar otras técnicas ahora muy en boga, como la propagación vegetativa y la mejora genética de especies vegetales de interés agrónomo, forestal y ornamental. (Mercedes Real.)

Ciencia y empresa

Azul celeste

Los láseres rojos de semiconductores dan buenos resultados en la lectura de datos de los discos ópticos y en multitud de aplicaciones más. Pero los fabricantes nunca han quedado satisfechos con su color: suspiran por el otro extremo del espectro. Como el azul es la longitud de onda más corta del espectro visible, tal láser permitiría comprimir más información en los discos compactos o poner los cimientos de impresoras en color de muy alta resolución.

Hasta ayer mismo, los expertos lograban a duras penas domeñar a los semiconductores para que emitiesen siquiera un poquito de luz azul. Pero en una conferencia reciente sobre investigación de dispositivos se anunció la creación del diodo láser de más corta longitud de onda: uno que emite luz azul verdosa. Michael A. Haase y sus colaboradores, de la empresa 3M, construyeron el láser a partir de seleniuro de zinc, material compuesto semiconductor. Los láseres de 3M producen luz a 490 nanómetros cuando se enfrían a —23 grados Celsius. El azul celeste corresponde a unos 465 nanómetros.

Los planos de construcción de estos dispositivos son semejantes a los empleados para los láseres de estado sólido más avanzados. La propia compañía 3M creó los láseres de pozo cuántico, en los que los electrones se elevan a niveles más altos de energía confinándolos a dos dimensiones. Tal pozo cuántico viene a ser una delgada rebanada de un compuesto semiconductor (en este caso, seleniuro de cadmio y zinc) dispuesta entre dos capas de un material semiconductor ligeramente diferente (seleniuro de zinc).

Ahora bien, para conseguir que, al paso de la corriente, emita luz el seleniuro de zinc, hubo que resolver antes una cuestión básica, a saber, la de embutir los transportadores de carga en el material. Un diodo emisor de luz o un láser de estado sólido ha de tener una unión *p-n*, lugar donde los portadores de carga positiva (huecos) se recombinan con los de carga negativa (electrones incidentes) y por ello emiten luz, o fotones. La diferencia de energía entre huecos y electrones, llamada salto o intervalo de banda, determina la longitud de onda de la luz emitida.

Desde hace casi treinta años, se sabía que el seleniuro de zinc ofrecía un intervalo de banda ideal para un láser azul. Pero no había forma de añadir suficientes portadores de carga positiva al material para conseguir una unión *p-n* eficaz.

Hace aproximadamente un año, los investigadores de 3M, junto con Robert M. Park, adscrito antes al grupo y ahora en la Universidad de Florida en Gainesville, dieron con una nueva técnica para embutir los huecos en el seleniuro de zinc. Comenzaron por desarrollar delgadas capas de seleniuro de zinc sobre una oblea de arseniuro de galio en una máquina de haz molecular de epitaxia (MBE). A medida que se iban formando las capas, expusieron la oblea a nitrógeno gaseoso excitado por ondas de radio. El nitrógeno crea entonces una concentración de huecos ("holes") en el material suficiente para permitirle emitir luz.

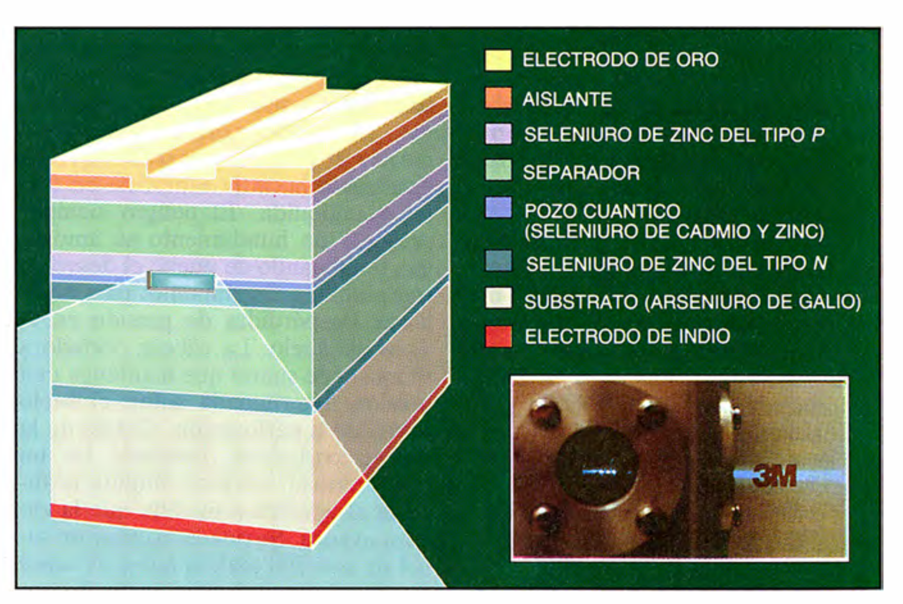
Al principio, se limitaron a construir diodos emisores de luz azul. Más tarde prepararon un pozo cuántico de seleniuro de zinc y cadmio y se encontraron con un láser.

Tras reunirse con el abogado de patentes de 3M, Haase y sus colegas comenzaron a escribir informes técnicos. Esperaron sólo lo suficiente para fabricar una segunda oblea —que también funcionó— y demostrar así que el primer resultado no había sido una casualidad. Aunque estos láseres funcionan a bajas temperaturas, confian en poder fabricar dispositivos que operen a la temperatura ambiente añadiendo más cadmio a los pozos cuánticos. Este láser será "un poco más verde", pues emitirá a 520 nanómetros.

Mientras tanto, habrán de vencer un obstáculo serio, por lo menos. Para producir luz, deben conectar a los láseres de seleniuro de zinc una tensión de alimentación de unos 20 volts, voltaje enorme para los láseres de estado sólido, que generalmente funcionan con dos o tres volts. Al someter el dispositivo a una tensión tan alta, se corre el riesgo de quemar los componentes. Las exigencias de energía han obligado a diseñar una operación pulsante, en vez de continua.

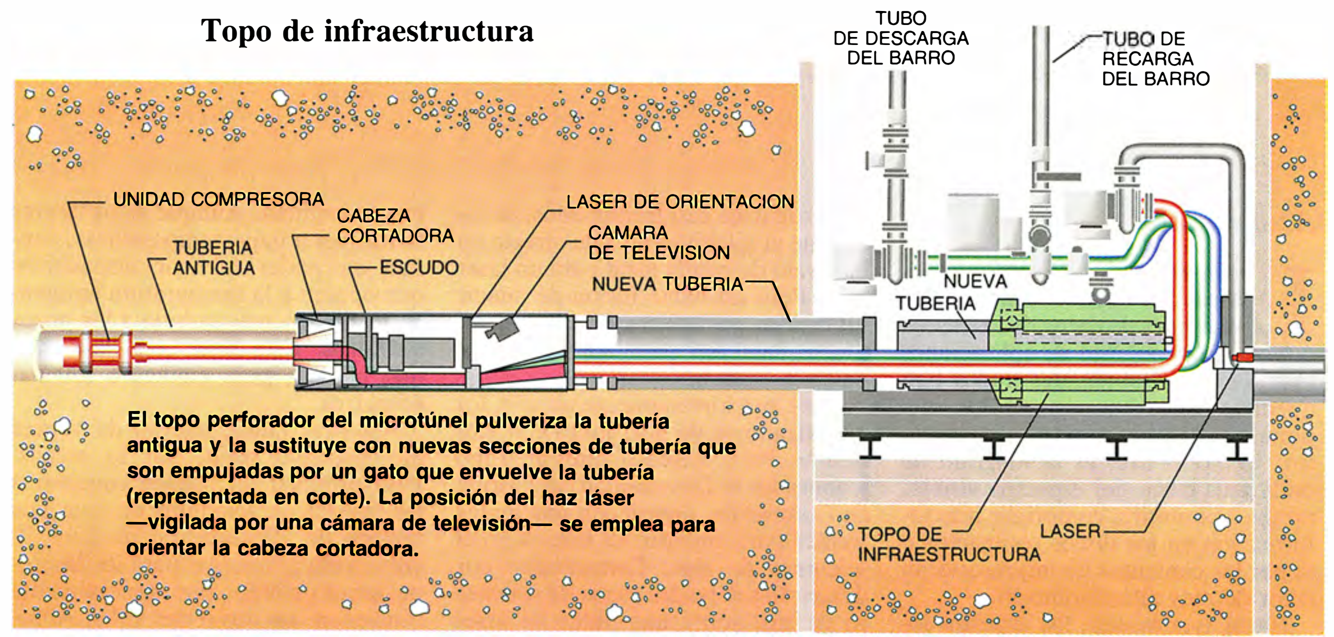
La razón de la avidez energética de tales dispositivos estriba en la naturaleza del contacto eléctrico que tiene que establecerse encima de las capas de semiconductor. No existe todavía la técnica que permita hacer contactos de baja resistencia con seleniuro de zinc portador de cargas positivas.

Hay otros grupos, allí y en otras partes del planeta, afanados en repetir los resultados de 3M. Científicos de la japonesa Matsushita han logrado añadir portadores de carga positiva al seleniuro de zinc, pero no se sabe que construyan ya dispositivos.



1. EL LASER DE SELENIURO DE ZINC, construido por la compañía 3M, emite luz azul verdosa. Está hecho con finas láminas de compuestos semiconductores.

Topo de infraestructura



El topo perforador del microtúnel pulveriza la tubería antigua y la sustituye con nuevas secciones de tubería que son empujadas por un gato que envuelve la tubería (representada en corte). La posición del haz láser —vigilada por una cámara de televisión— se emplea para orientar la cabeza cortadora.

FUENTE: *Iseki*

Hay también quien se ha empeñado en adaptar sus máquinas MBE a la excitación de gas nitrógeno.

Labor de zapa

El estado del arte en la ingeniería de obras públicas no ha logrado todavía arrumbar el pico y la pala. La tarea monótona de tender una nueva alcantarilla consiste, aún, en excavar una zanja, poner las tuberías y tapar de nuevo la zanja con la tierra sacada. Los daños producidos en pavimentación y aceras, por no mencionar las molestias del usuario de la calle, pueden ser importantes.

Algunas constructoras y empresas de maquinaria para obras públicas están, sin embargo, dispuestas a hacer más llevadera la hora punta. Laboran en la "construcción sin zanjas", así llamada porque se se sirven de chorros de agua a alta presión o herramientas con cuchillas giratorias para excavar cavidades donde quepa una tubería o un cable.

Quizás el ejemplo más elaborado de esa técnica lo represente la perforadora de microtúneles, versión en miniatura de las rompedoras imponentes que emplea el grupo anglo-francés para excavar el Canal de la Mancha. Su precio oscila entre 500.000 y un millón de dólares la unidad.

Las máquinas para perforar microtúneles aparecieron, mediados los años setenta, pensando en zonas urbanas congestionadas y en ciudades donde las empresas de servicios públicos encontraban grandes dificultades para abrir zanjas en las calles.

Pero el primer avance decisivo en la expansión de esa técnica se produjo en 1987, cuando cierta comunidad de propietarios de una urbanización de postín en Houston se negó a permitir que el ayuntamiento destrozara sus privadísimas calles y cuidados jardines para instalar un nuevo sistema de alcantarillado. Desde entonces, se han usado los microtúneles en más de veinte proyectos.

Los topos, denominación acertada para designar las máquinas perforadoras de microtúneles, miden unos dos metros de longitud; poseen cabezas cortadoras giratorias que pueden inclinarse hacia arriba, hacia abajo o lateralmente, para excavar agujeros de 20 a 90 centímetros de diámetro a través de suelos cuya contextura varía desde arena hasta roca blanda. Se las habilita también para sustituir tuberías viejas por otras nuevas. La cabeza cortadora del topo mezcla el material excavado, que es bombeado hacia la superficie en forma semilíquida. El peligro siempre presente de hundimiento se amortigua bombeando de nuevo el desecho, tras eliminar el sedimento, para equilibrar las pérdidas de presión en el agua del suelo. La cabeza cortadora se ajusta de suerte que mantenga una presión determinada sobre el suelo sometido a perforación. Detrás de la cabeza cortadora, instalado en un pozo vertical, un gato empuja la tubería al agujero a medida que la cabeza avanza. Se puede excavar un túnel de casi 500 metros antes de tener que preparar otro pozo vertical.

Se pretende crear el topo "inteligente", que porte un sistema de control de guía basado en lógica "difusa" (o "borrosa"), programa informático que responde a conceptos vagos tales como "mucho" y "poco". El sistema de lógica difusa compara la posición actual de la máquina con datos históricos de trabajos anteriores para calcular cómo maniobrar al objeto de mantenerla en el camino deseado.

En algunos aspectos, cuesta más perforar un microtúnel que abrir un subterráneo por donde quepa un camión. Se entiende fácilmente: el operador sentado ante el panel de control en superficie debe guiar el aparato por control remoto. Hasta ahora, en los proyectos de cierta entidad un láser alinea la cabeza cortadora con un error de dos a cinco centímetros respecto a lo especificado.

Tardaremos en ver en las vitrinas de los museos los prehistóricos pico y pala si no bajan los costes de la maquinaria perforadora. Mas, a pesar de los recortes de los presupuestos municipales, habrá que pensar en la perforación de microtúneles en aquellas zonas donde haya que tender una red profunda de alcantarillado o donde la excavación tradicional pueda perturbar un ecosistema urbano frágil. Con el tiempo, podría convertirse en técnica ideal para enterrar residuos peligrosos.

Inmunología industrial

Nadie ha visto nunca la molécula que Mark A. Gallop quiere construir. Su vida no llega a la millonésima de segundo. Gallop trabaja,

en calidad de coordinador de química bio-orgánica, en la empresa Affymax instalada en la californiana Palo Alto; su objetivo: crear una analogía sintética del sitio activo de una enzima en el instante exacto en que se enlaza a su blanco. La enzima en cuestión transforma un precursor químico en un nuevo pariente de la isopenicilina. Después, se trataría de exponer células del sistema inmune a esos análogos; y, si todo funciona de acuerdo con lo proyectado, los anticuerpos que resulten actuarán sobre el precursor de la penicilina, posibilitando un camino sencillo de fabricación de una nueva versión, más eficaz, del antibiótico.

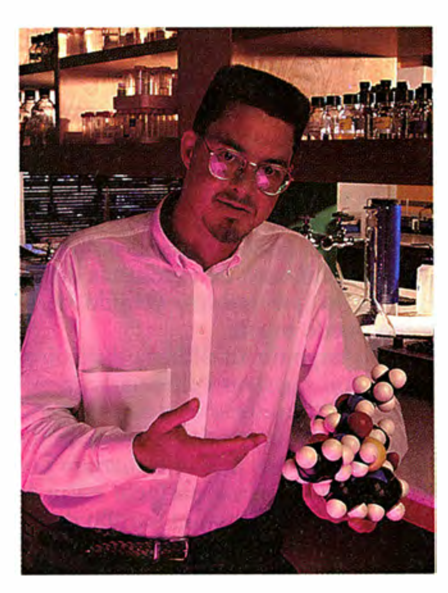
Pero Gallop no anda solo en esa lid. Químicos, farmacéuticos y bioquímicos saben que el organismo sintetiza de forma espontánea anticuerpos para combatir los venenos, la toxina del tétanos y millones de compuestos que le son extraños. Por tanto, introduciendo una substancia sintética, un antígeno, se deben producir anticuerpos altamente específicos y dotados de las propiedades que se desean instar contra ese cuerpo extraño.

Los anticuerpos fabricados para reconocer enlaces químicos específicos podrían comportarse a la manera de las enzimas y catalizar reacciones químicas que no se producen en la naturaleza. En los laboratorios se han desarrollado nuevas formas de fármacos mediante complicadas y laboriosas operaciones de química orgánica, pero no se ha podido dar con enzimas para fabricarlos fácilmente. Por eso se confía en que los anticuerpos catalíticos realicen las reacciones necesarias.

Con Affymax son bastantes las empresas que han puesto su mirada en la capacidad del sistema inmune para convertirse en fuente de nuevos catalizadores químicos: Igen y Catalytic Antibodies, Inc., esta segunda fundada en la Universidad de California en San Francisco, preparan anticuerpos catalíticos; Rhone-Poulenc financia alguna línea de trabajo; Abbot Laboratories alienta grupos internos en sus centros que husmeen en ese campo. De los japoneses, que destacan en la fabricación de enzimas, se rumorea que poseen un centenar de laboratorios implicados.

Las empresas trabajan con la seguridad de que los anticuerpos catalíticos servirán para fabricar fármacos y productos químicos orgánicos, sin desdeñar su eficacia terapéutica propia. Las moléculas, formadas por cadenas de proteínas que se enlazan en forma de Y, podrían recetarse en casos de cáncer o enfermedades raras, para disolver coágulos en la sangre o desintoxicar un organismo expuesto a gases nerviosos. Nadie, sin embargo, comenta ni publica nada, para no dar pistas a los competidores.

Para sintetizar anticuerpos catalíticos, se pone a prueba a las células inmunes: se le aportan análogos químicos de los estados de transición a través de los cuales pasan las moléculas durante una reacción química. El anticuerpo producido en respuesta está efectivamente adiestrado para reconocer ese estado particular y de mínima duración. Engarzándolo en el



2. EL MODELO DE Mark Gallop, bioquímico de la empresa Affymax en Palo Alto, del punto activo de una enzima puede conducir a una nueva manera de fabricar penicilina. Foto: Matthew Mulbry.

sitio idóneo, el anticuerpo acelera la velocidad de variación del enlace químico.

Es frecuente que se escinda entonces parte de la molécula enlazada, de modo que las piezas puedan intervenir en otras reacciones. Una vez que quedan libres los productos de reacción separados, el anticuerpo se traslada a una molécula entera para repetir el proceso.

La especificidad del enlace es crucial para producir un anticuerpo catalítico útil. La cuidadosa selección del antígeno es un primer paso, pero también se ha de contar con los imponderables. Cualquier antígeno provoca la producción de hasta 40 o 50 anticuerpos, cada uno de los cuales ve diferentes caras o regiones de la molécula. Para intensificar el efecto, Richard A. Lerner, de la Clínica Scripps y asesor de Affymax, ha desarrollado una técnica llamada mutagénesis de sitio aleatorio que produce literalmente miles de anticuerpos.

La selección del mejor anticuerpo entre el número ingente de candidatos constituye uno de los principales obstáculos que retrasan su comercialización. Affymax, que ya ha desarrollado una técnica de cribado de péptidos, trabaja ahora en pruebas de gran volumen. A modo de muestra, en un experimento de ésos hay miles de moléculas marcadas con substancias fluorescentes que están ligadas a una placa de prueba; cuando el catalizador las divide, refulgen; el anticuerpo responsable queda pegado a la placa y pueden entonces identificarlo.

Una de las primeras aplicaciones de los anticuerpos catalíticos irá asociada a la creación de productos farmacéuticos aislados de su simétrico. Muchos compuestos se producen junto con su simétrico especular, que suele ser inútil y por ello diluye la potencia del primero. Algunos incluso son tóxicos. Estos podrían capturarse mediante anticuerpos catalíticos inmovilizados sobre cuentas de vidrio dentro de las cámaras de reacción.

Peter G. Schultz, bioquímico de la Universidad de California en Berkeley y uno de los científicos fundadores de Affymax, sugiere que los anticuerpos catalíticos podrían hallar pronta aplicación en la farmacoterapia anticancerosa: los anticuerpos normales, capaces de reconocer tejidos que han sufrido una mutación tumoral (riñón o pulmón, por ejemplo), transportarían un anticuerpo catalítico al lugar. Se administraría entonces al paciente una dosis de un fármaco o toxina que viajaría por el cuerpo en estado inactivo hasta que encontrase el tumor. Los anticuerpos catalíticos allí anclados reconocerían y romperían un enlace en el fármaco para activarlo localmente. Esta administración "in situ" podría evitar los efectos secundarios de las actuales terapias del cáncer, en las cuales poderosos fármacos circulan libremente.

Antes de que los anticuerpos catalíticos alcancen un empleo generalizado, especialmente en aplicaciones industriales de alto volumen, habrá que reducir los costes. Hasta ahora se han cultivado en células de mamíferos, pero recientemente ciertos sistemas bacterianos baratos, como el de *Escherichia coli*, han demostrado proporcionar grandes cantidades de anticuerpos proteínicos.

Representación de partículas elementales

Cómo y por qué 25.000 millones de bits de datos, producidos en menos de un segundo, se traducen en imágenes de partículas elementales

Horst Breuker, Hans Drevermann,
Christoph Grab, Alphonse A. Rademakers y Howard Stone

El Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP) es uno de los más potentes aceleradores de partículas jamás construido. Lanza electrones contra positrones, sus análogos de antimateria, liberando hasta 100.000 millones de electronvolts de energía en el interior de cada uno de los cuatro enormes detectores habilitados. Cada pulso de energía genera un chorro de centenares de partículas elementales, cuyo seguimiento corre a cargo de centenares de miles de sensores. En menos de un segundo un sistema electrónico debe buscar, entre los datos suministrados por unos 50.000 choques electrón-positrón, una o dos colisiones frontales que aporten alguna información valiosa sobre las fuerzas fundamentales y las partículas elementales de la naturaleza.

Cuando los sistemas electrónicos identifican uno de esos sucesos prometedores, se debe transmitir una imagen de los datos al procesador más ingenioso que se haya creado nunca. Nos referimos al principal dispositivo con que cuenta la física experimental, recurso éste que ha tardado en desarrollarse muchos más años que el colisionador LEP. Se trata del cerebro humano.

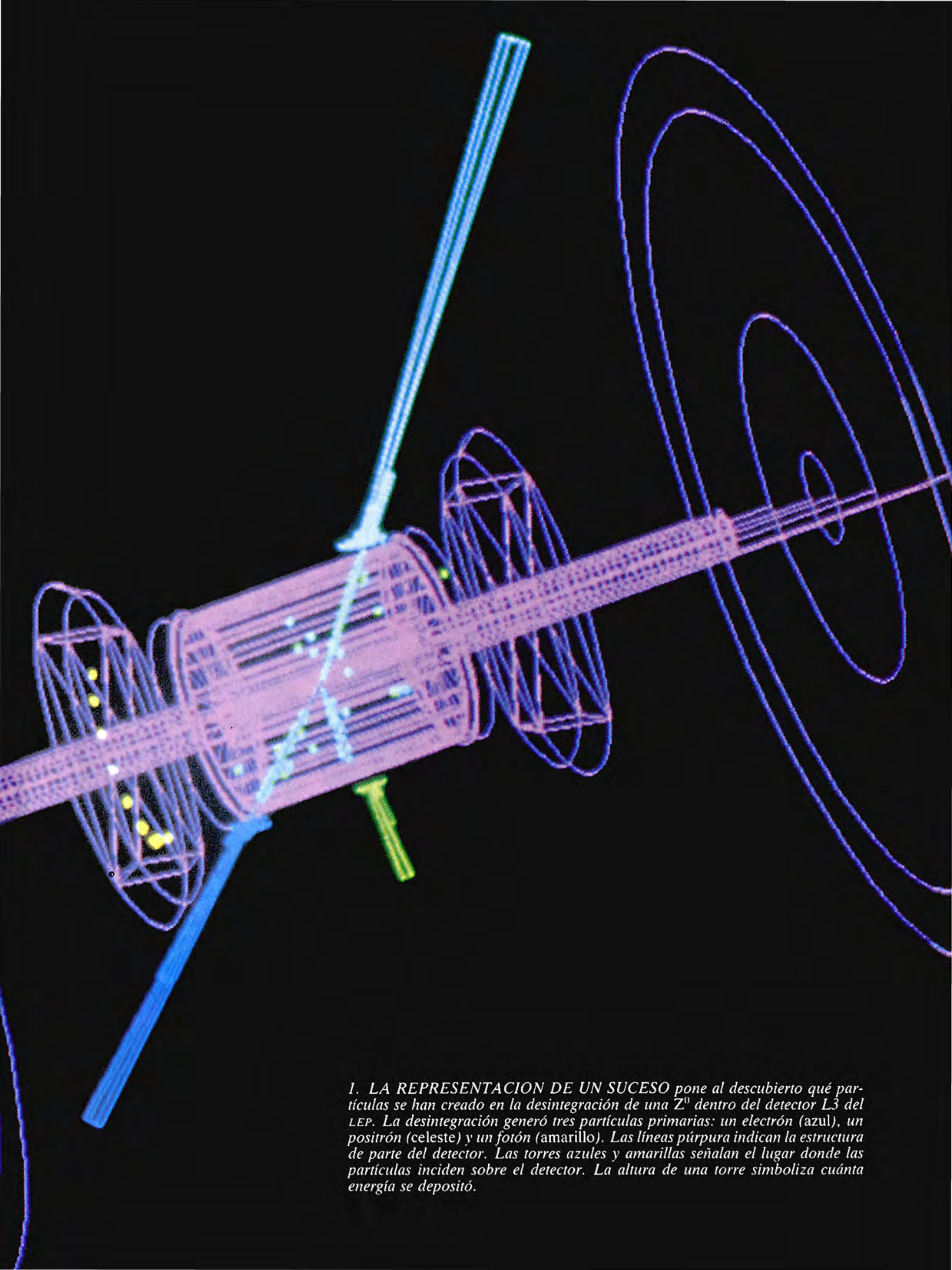
Los ordenadores no pueden igualar la capacidad del cerebro en el reconocimiento de estructuras complicadas que emergen de los datos recogidos por los detectores del LEP. El proceso de comprensión de los sucesos subnucleares comienza, por tanto, con la representación de objetos que son billones de veces menores que lo que el ojo puede percibir y que se mueven millones de veces más deprisa que lo que nuestro sentido de la vista puede seguir.

A lo largo de los últimos diez años, junto con nuestros colaboradores del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas con sede en los aledaños de Ginebra, nos hemos esforzado por diseñar la interfase perfecta entre la mente de los físicos y el barullo de señales electrónicas registradas por los detectores del LEP. Mediante ordenadores muy potentes traducimos los datos sin elaborar —500.000 valores por cada suceso— en imágenes claras y comprensibles. Nos servimos de figuras, curvas y colores para representar las trayectorias de las partículas, su clase, su energía, etc.

Ese trabajo nuestro allanó el camino para varios descubrimientos importantes desde que el colisionador LEP entró en funcionamiento, hace un par de años. Los físicos del LEP han investigado, con un detalle sin precedentes, la partícula Z^0, que transmite una de las cuatro fuerzas fundamentales, la interacción débil, lo mismo que los fotones transmiten la fuerza electromagnética. Para mejor conocer la naturaleza de la interacción débil, los físicos adscritos al LEP determinaron con precisión la masa de Z^0 y observaron su desintegración en otras partículas. Investigaciones que sirvieron para corroborar la hipótesis de una materia formada por sólo 12 partículas elementales: seis clases de quarks y seis leptones. Con el desarrollo de ulteriores experimentos en el colisionador LEP esperamos encontrar nuevas clases de materia y

HORST BREUKER, HANS DREVERMANN, CHRISTOPH GRAB, ALPHONSE A. RADEMAKERS y HOWARD STONE han diseñado los sistemas de representación de sucesos para los detectores del LEP del CERN, laboratorio europeo de física de partículas que hay cerca de Ginebra.





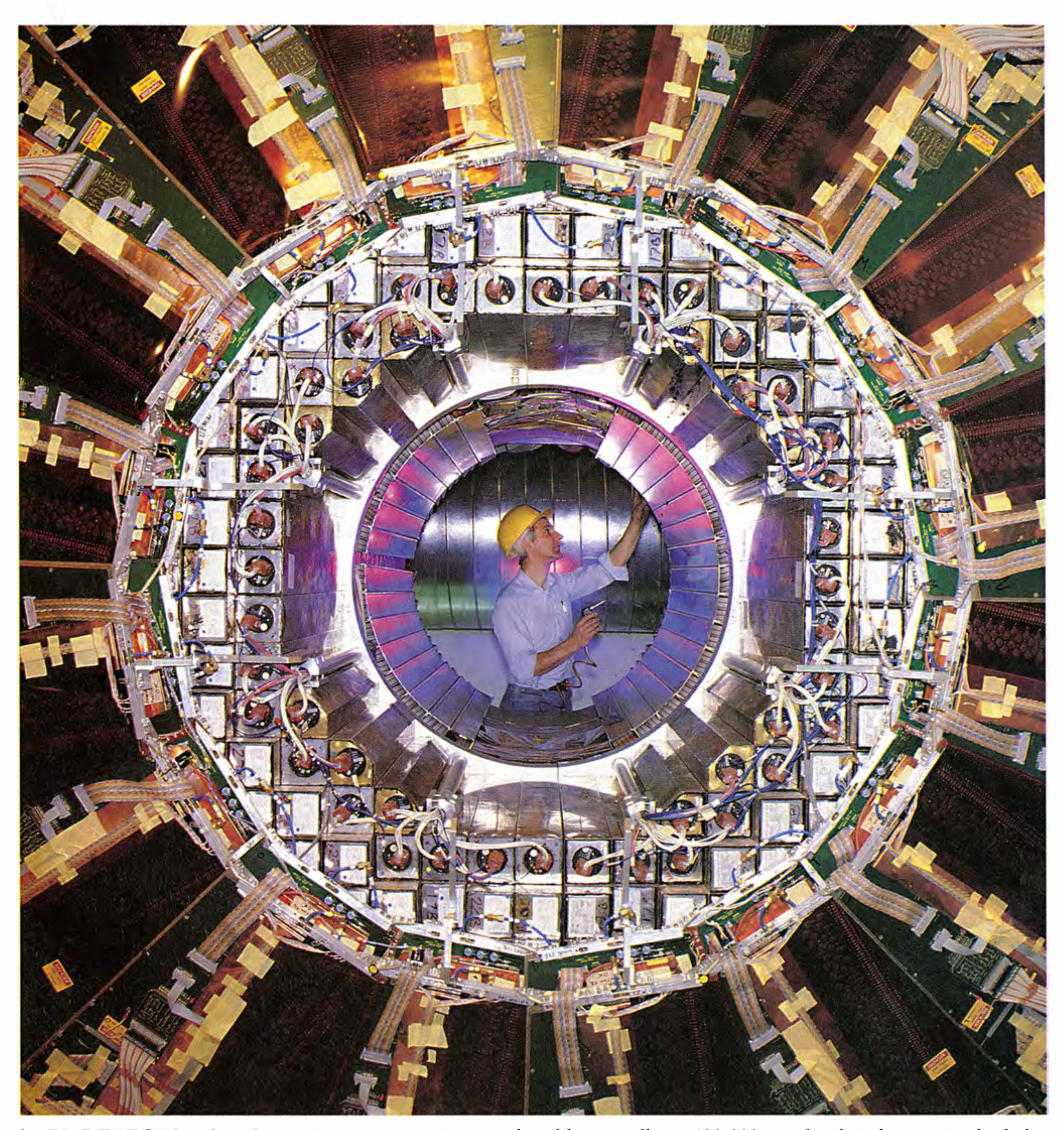
1. LA REPRESENTACION DE UN SUCESO pone al descubierto qué partículas se han creado en la desintegración de una Z^0 dentro del detector L3 del LEP. *La desintegración generó tres partículas primarias: un electrón* (azul), *un positrón* (celeste) *y un fotón* (amarillo). *Las líneas púrpura indican la estructura de parte del detector. Las torres azules y amarillas señalan el lugar donde las partículas inciden sobre el detector. La altura de una torre simboliza cuánta energía se depositó.*

estudiar los procesos que generan los quarks y leptones.

Las técnicas para seguir el curso de las partículas y representarlo han cambiado drásticamente durante las tres últimas décadas, con el fin de acompasarlas a los progresos registrados en los aceleradores.

Para controlar las colisiones entre partículas, o "sucesos", tal como se les llama a menudo, los físicos se han venido apoyando en sucesivos detectores: cámaras de niebla, cámaras de burbujas y cámaras de avalancha o descarga. En cada dispositivo de éstos se detecta la partícula cargada en su movimiento por cierto medio con el rastro de átomos ionizados que va dejando. En las cámaras de niebla, los átomos ionizados provocan la condensación de gotitas de agua. En las cámaras de burbujas, la ionización inicia la formación de burbujas en un líquido. En las cámaras de avalancha, los átomos ionizados interaccionan con un campo eléctrico de alto voltaje produciendo chispas. Las hileras de gotas de agua, de burbujas o de chispas se registran en una película.

Las fotografías recogen la historia entera y detallada de los sucesos; al experimentador le basta con echarles un vistazo para saber qué ha pasado. En las postrimerías de los años sesenta, se introdujeron los ordenadores para realizar el escrutinio automático de las fotografías. No era infrecuente, sin embargo, que las imágenes, complicadas, confundieran al ordenador, y había que acudir a la intervención humana para proceder al análisis.



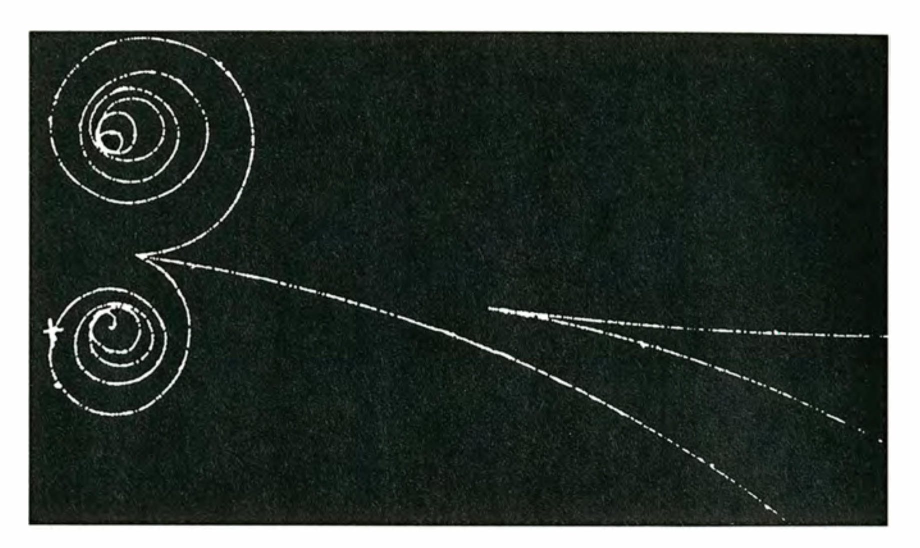
2. EL DETECTOR OPAL necesita un número ingente de cables para llevar 180.000 canales de información desde los sensores hasta un sistema de adquisición de datos. Los haces de partículas se canalizan a través del centro del detector.

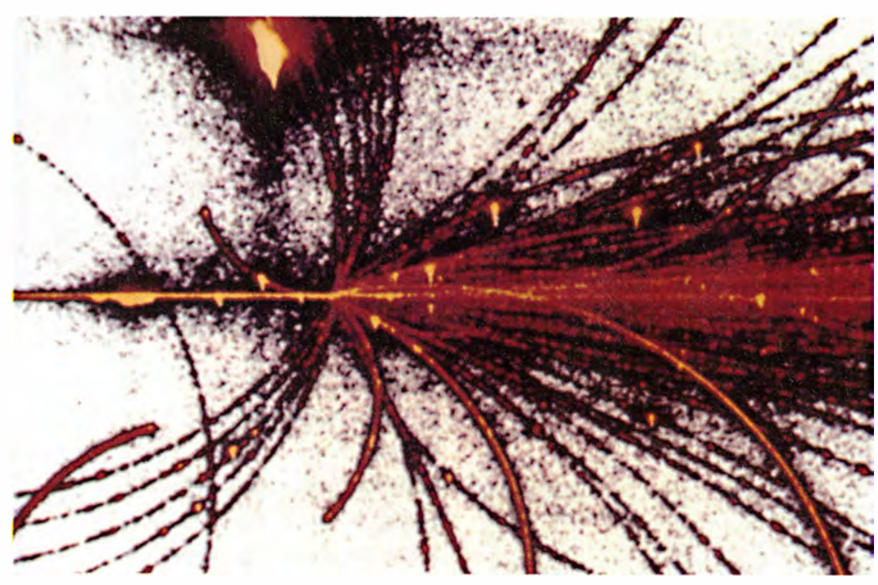
El advenimiento de aceleradores que producían miles de partículas por segundo dejó atrás la posibilidad de seguir registrando sucesos en película. El registro de partículas a esas velocidades demandaba detectores electrónicos refinados. El almacenamiento electrónico de la información convirtió a los ordenadores en instrumento esencial para tomar decisiones rápidas durante la recogida de datos.

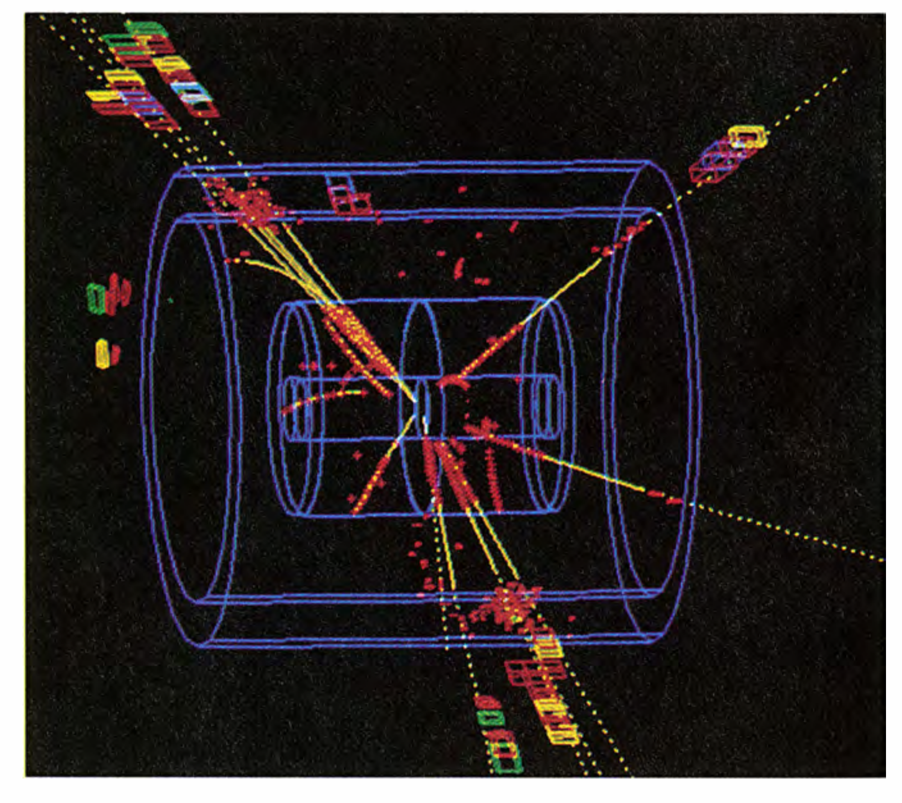
Pero los físicos no pueden dejar todavía en exclusiva el análisis de los datos a los ordenadores. Los que inspeccionan los sucesos automáticamente están limitados por la voluntad del programador. Tales sistemas pueden, de manera selectiva, suprimir información u obscurecer fenómenos insólitos. Mientras no aparezca un programa de reconocimiento de imágenes que funcione mejor que el cerebro humano, será necesario producir imágenes de los sucesos que revistan mayor complicación e interés para que los físicos examinen los datos. Esta fue la estrategia adoptada a la hora de diseñar los detectores del LEP a principio de los años ochenta.

El colisionador LEP y sus detectores ocupan un túnel que recorre la frontera franco-suiza por debajo de las montañas del Jura. El colisionador está formado por imanes y cavidades de aceleración que rodean un trazado circular de 26,7 kilómetros de circunferencia. Los imanes guían a los electrones y a los positrones a lo largo del trazado en sentidos opuestos. Las cavidades confieren energía a las partículas, acelerándolas hasta 50.000 millones de electronvolts. Los electrones y positrones chocan frontalmente en el centro de cuatro detectores: Aleph, Delphi, L3 y Opal.

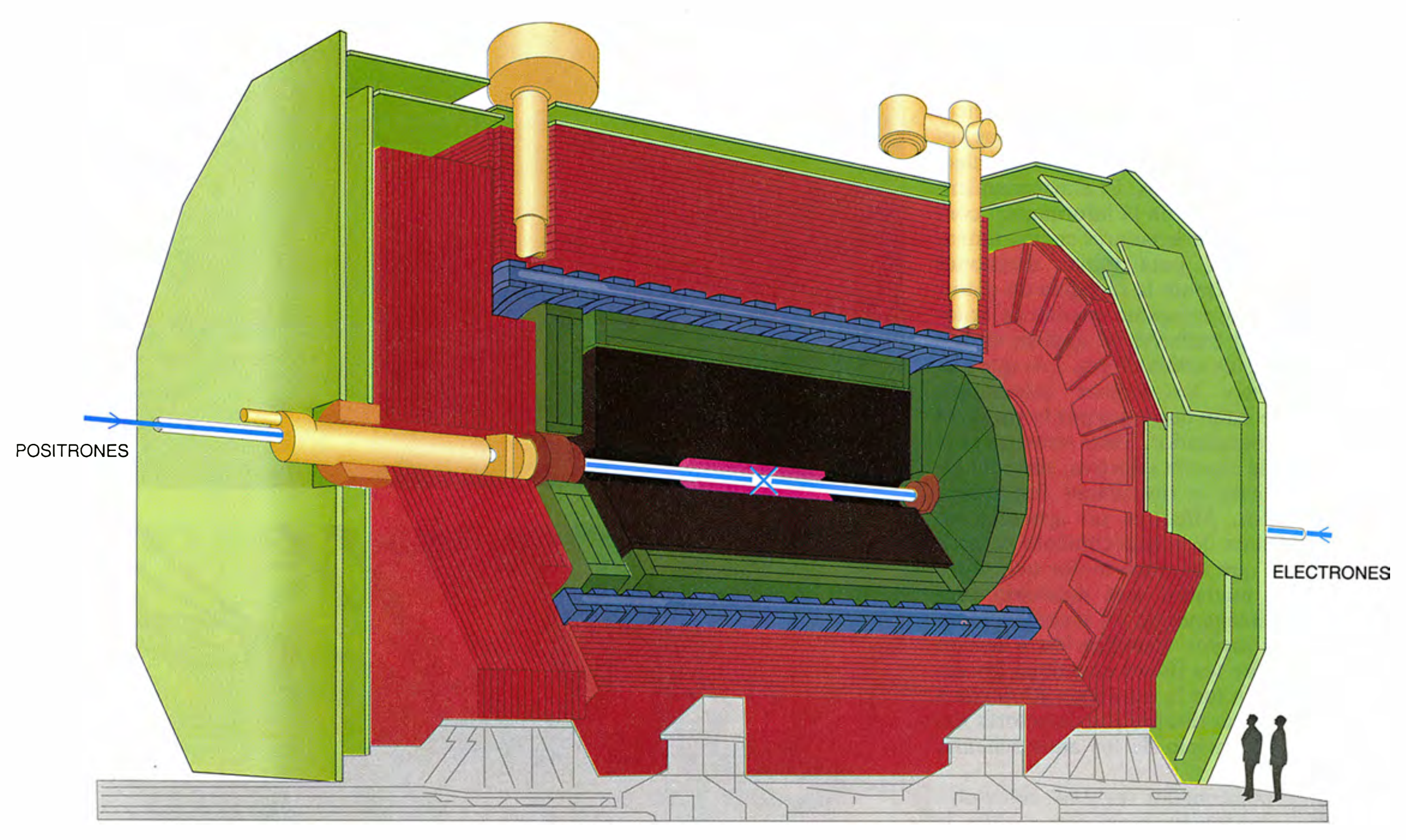
Las colisiones entre electrones y positrones liberan hasta 100.000 millones de electronvolts a un ritmo inigualado por ningún otro acelerador electrón-positrón. La energía se con-







*3. LAS IMAGENES DE LAS PARTICULAS han evolucionado al paso de la creación de nuevos sistemas detectores. Cuando las partículas atraviesan una cámara de burbujas, generan hileras que pueden fotografiarse (*arriba*). En las cámaras de avalancha, las partículas provocan la formación de chispas que pueden registrarse electrónicamente. Las señales pasan a un ordenador, que produce una imagen (*centro*). La representación inferior da cuenta de los datos recogidos por el detector Delphi del LEP. Muestra una Z^0 que se desintegra en dos chorros de hadrones y, a la derecha, dos muones aislados.*



4. REPRESENTACION GRAFICA de los sucesos: nos permite seguir las trayectorias de las partículas y observar sus energías en el interior del detector (en este caso, el experimento Aleph). El diagrama de arriba muestra los componentes de Aleph. A la derecha, tres despliegues de un suceso.

- Contador de muones
- Calorímetro hadrónico
- Imán
- Calorímetro electrón/fotón
- Cámara de seguimiento exterior
- Cámara de seguimiento interior
- Trayectoria de una partícula
- Zona del calorímetro alcanzada por una partícula
- Detección de hadrones (la longitud de la barra es proporcional a la energía del hadrón)
- Detección de electrones o fotones (la longitud de la barra es proporcional a la energía de la partícula)

vierte en una partícula de vida media muy corta, casi siempre una Z^0. A continuación, estas partículas se desintegran en muchas, más ligeras.

Medir el mayor número posible de esas partículas constituye el objetivo principal de los detectores del LEP. Los cuatro —Aleph, Delphi, L3 y Opal— utilizan con ese fin métodos parecidos, aunque se basan en técnicas algo distintas; los cuatro son, quizá, los detectores más sensibles y complejos jamás construidos.

Cada detector consta de miles de toneladas de sofisticados sensores electrónicos que vienen a revestir el punto donde colisionan electrones y positrones. Una partícula que se produzca en la colisión cruza primero una cámara de seguimiento que está llena de un gas. Una partícula cargada que viaje por el gas deja un rastro de electrones. Estos atraviesan luego hilos sensibles y producen señales que servirán más tarde para deducir la posición del rastro ionizado y, por tanto, la trayectoria de la partícula. Las cámaras de seguimiento del LEP pueden señalar la posición de una partícula con una precisión típica de 50 millonésimas de metro.

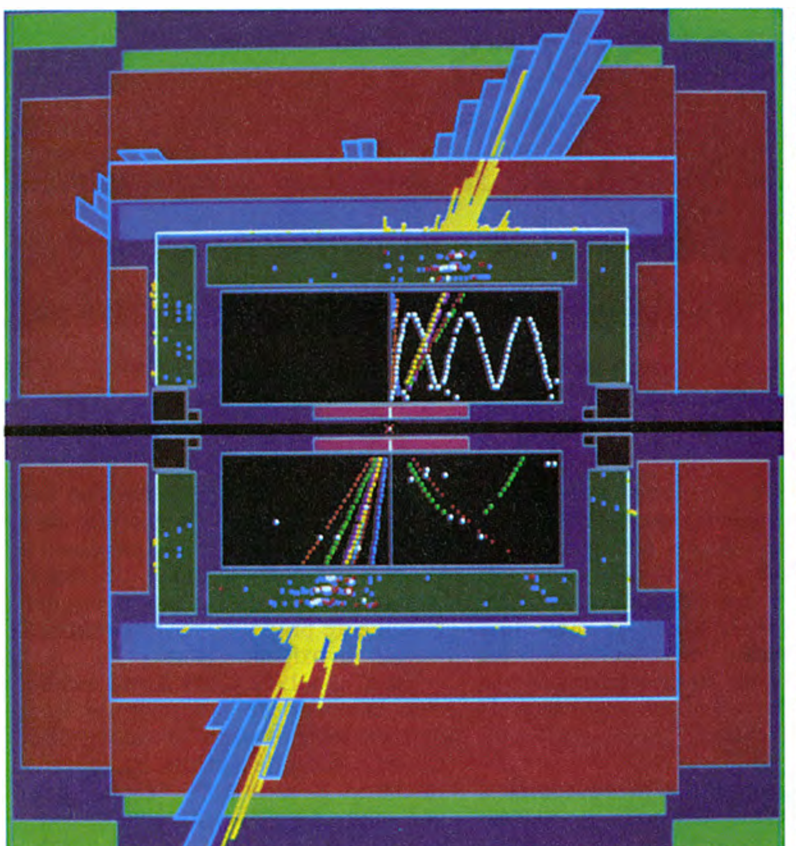
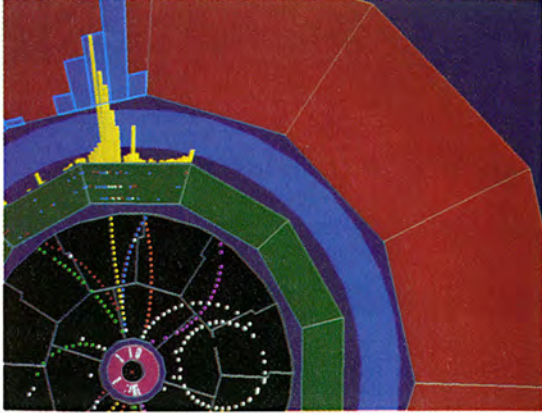
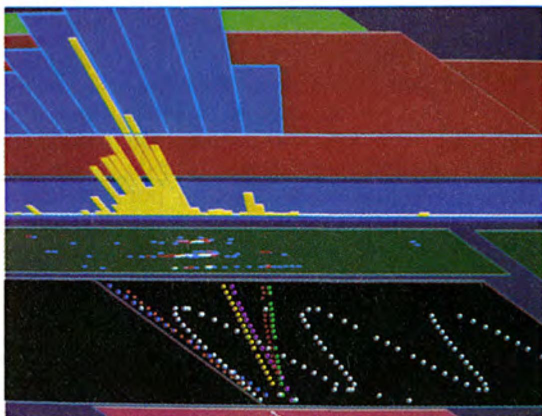
Los siguientes componentes principales de los detectores son los calorímetros interiores y exteriores, que miden la energía de las partículas. Cada calorímetro aloja decenas de miles de sensores. Si una partícula incide sobre uno de los sensores, produce una señal que es proporcional a la energía de la partícula. La situación del sensor en el interior del calorímetro nos revela por dónde esa partícula atravesó el detector.

El calorímetro interior captura sólo electrones y fotones. El exterior absorbe hadrones (en cuya clase se integran neutrones y protones), que están formados por quarks.

Los muones y los neutrinos atraviesan los calorímetros sin ser detectados. Los muones, una suerte de primos de los electrones aunque dotados de mayor masa, son prácticamente las únicas partículas cargadas que atraviesan los calorímetros y, por tanto, se identifican en cámaras de seguimiento que rodean los calorímetros. Los neutrinos, que son neutros, no se detectan en absoluto, pero se puede inferir su presencia indirectamente, a partir de las trayectorias y las energías de las demás partículas.

Las cámaras de seguimiento y la mayoría de los calorímetros están rodeados por un imán cuyo campo condiciona el comportamiento de las partículas cargadas dentro de todo el detector. El control de los efectos de los campos ayuda a identificar las partículas y a medir su momento.

Los detectores del LEP están diseñados para captar cada segundo 50.000 encuentros entre electrones y positrones. En cada suceso, unos 500.000 componentes del detector envían una señal eléctrica que más tarde puede convertirse en información relativa a la posición o la energía de una partícula. Las señales se transmiten a un conjunto de procesadores de datos. Este sistema busca señales clave que avalen el interés del suceso. Pero, si carece de relevancia, el sistema des-

carta los datos. Sólo uno o dos de estos 50.000 encuentros acabarán almacenados en los ordenadores.

Para que los téoricos pudieran disponer de la información esencial que importa conocer sobre un suceso, hemos desarrollado muchos programas de ordenador que traducen los datos en imágenes. Algunos programas buscan un suceso entre los datos y entonces intentan saber cuántas partículas se produjeron y qué curso tomaron.

Otros programas representan las trayectorias de las partículas, consideradas en su mutua relación con respecto a los componentes del detector. Estos programas indican también dónde capturaron los calorímetros a las partículas y cuánta energía absorbieron. Por ejemplo, para dar una impresión de la distribución de energía entre las partículas, un programa puede asignar colores a las trayectorias de las partículas que estén comprendidas en cierto intervalo de energía.

Los programas de ordenador dejan que el usuario escoja la forma de presentar los datos. Ante un objeto en la pantalla del ordenador, se solicita la información que nos interese del mismo. De ese modo, la imagen ofrecida viene a constituir un compendio de la información relativa a un suceso recogida por el detector.

Un aspecto importante es el de la capacidad de suministrar información espacial en tres dimensiones sobre una pantalla plana de ordenador. Si representamos un suceso desde un solo punto de vista, podría interpretarse mal, pues trazas que se hallan alejadas podrían aparecer muy juntas. Para obviar ese problema, la mayoría de programas representan el suceso desde distintos puntos de vista o están capacitados para desplazarlo con continuidad desde un punto de vista a otro como si el modelo tridimensional del suceso estuviera girando dentro del monitor. Estas técnicas permiten hacerse la idea del suceso en tres dimensiones y encontrar la perspectiva más clara.

En las primeras fases de los experimentos, los programas de representación de sucesos ayudarían a descubrir las dificultades surgidas en los sistemas del detector, cuando los programas producían imágenes que presentaban discordancias entre los datos y las leyes de la física. Tales contradicciones débense a un mal funcionamiento de una parte del detector, del sistema de adquisición de datos o de los programas de análisis de datos.

Durante los ensayos, se examinan, de manera rutinaria, sucesos seleccionados al azar, para asegurarse de que todo opera correctamente. Esta medida familiariza al técnico con el funcionamiento del detector. Mecanismo complejo, al fin, el detector posee sus rarezas; algunas zonas parecen proclives a crear problemas y otras a hacerlo a intervalos. Conviene conocer ese comportamiento para un análisis preciso de los datos.

La representación de los sucesos sirve, por último, de instrumento para descubrir pistas de nuevos fenómenos, mediante la identificación de estructuras inesperadas entre las partículas o de correlaciones entre trayectorias y la energía depositada en los calorímetros. Analizando tales estructuras y correlaciones, los investigadores del LEP han preparado el camino para el mejor conocimiento de la partícula Z^0 y de los procesos que crean quarks y leptones.

Porque aportan información sobre estructuras de sólo 10^{-18} metros, podemos considerar los detectores unos microscopios extremadamente potentes que revelan la belleza de los últimos componentes del universo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GRAPHICAL CONCEPTS FOR THE REPRESENTATION OF EVENTS IN HIGH-ENERGY PHYSICS. H. Drevermann y C. Grab en *International Journal of Modern Physics C*, vol. 1, n.º 1, págs. 147-163; 1990.

PARTICLE PHYSICS AFTER A YEAR OF LEP. David J. Miller en *Nature*, vol. 349, págs. 379-387; 31 de enero de 1991.

Biosensores

Los refinados descendientes de los canarios que se utilizaban antiguamente en las minas de carbón están basados en el uso de ciertos componentes moleculares orgánicos, unidos a electrodos microscópicos o fibras ópticas

Jerome S. Schultz

Un hombre de 63 años se encuentra en la cama de un hospital, recuperándose tras una operación rutinaria de cadera. De pronto, su corazón empieza a latir de forma irregular. En un intento por restablecer el ritmo normal del corazón, médicos y enfermeras extraen muestras de sangre para analizar los niveles de oxígeno, potasio y calcio, *p*H, hematócrito y otros factores que podrían proporcionar una pista para averiguar la fuente del peligro.

Lo normal es que los resultados del laboratorio tarden una hora o más en volver, demasiado quizá para ser útiles. Por otra parte, una información sobre la química de la sangre del paciente, cuando ya han transcurrido 10 o 15 minutos desde el momento en que la arritmia se presentó, no es todo lo que los médicos quisieran saber. El conocimiento de la forma en que la química de la sangre cambió antes de que se produjeran los latidos irregulares revestiría mayor interés.

El uso de biosensores —detectores basados en ciertos componentes seleccionados de los animales y las plantas— permite disponer de resultados analíticos en la cabecera del enfermo al cabo de unos minutos. Los sistemas que se están poniendo a punto podrían ofrecer no sólo una simple instantánea del estado de los pacientes, sino también una "cinta de vídeo bioquímica" de tipo continuo.

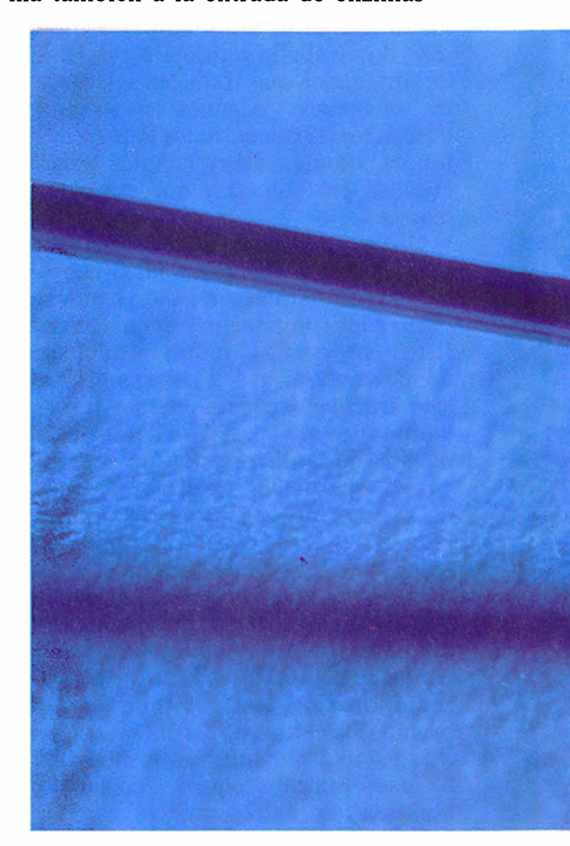
Los biosensores modernos son el resultado de la conjunción de dos disciplinas muy diferentes: la tecnología de la información, que se puede ilustrar a través de los ejemplos de los microcircuitos y las fibras ópticas, y la biología molecular. La primera proporciona los electrodos de minúsculas proporciones o los sensores ópticos; la segunda, las biomoléculas que son capaces de reconocer una sustancia diana o efectora.

JEROME S. SCHULTZ es director del centro de biotecnología y bioingeniería de la Universidad de Pittsburgh, donde dirige la investigación sobre biosensores e inmunotecnología. Anteriormente, había sido profesor de ingeniería química en la Universidad de Michigan y colaborador de la Fundación Nacional para el Fomento de la Ciencia. Se formó en las universidades de Columbia y Wisconsin.

Hay tantas aplicaciones potenciales de estos dispositivos cuantas moléculas distintas pueden incorporar. Los servicios de atención médica se pueden beneficiar de los biosensores de forma muy clara e inmediata, no sólo en el campo de los ensayos clínicos, sino también en el de la fabricación de productos farmacéuticos y en el desarrollo de órganos de repuesto tales como páncreas artificiales para diabéticos. Los biosensores se emplean también para determinar la calidad e inocuidad de los alimentos y para detectar contaminantes medioambientales.

La evolución del primer biosensor se inició a mediados de la década de los cincuenta, cuando Leland C. Clark, Jr., de la Fundación de Investigación Hospitalitaria Infantil de Cincinnati, inventó un electrodo capaz de medir la cantidad de oxígeno disuelto en la sangre de los pacientes sometidos a una intervención quirúrgica. Rodeó un electrodo de platino ordinario y un electrodo de referencia con una membrana plástica permeable a los gases. La diferencia de voltaje en el electrodo de platino se ajustó de forma tal que la intensidad de la corriente a través del circuito dependiera de la cuantía en que el oxígeno se difundía a través de dicha membrana, tasa que, a su vez, era directamente proporcional a la concentración de oxígeno externo.

En el año 1962 Clark había extendido el campo de aplicación de este "electrodo de oxígeno" a la detección de los niveles de glucosa en sangre. Recubrió el sensor de oxígeno con una capa de gel que contenía un biocatalizador, la enzima oxidasa glucosa, seguida por una membrana de diálisis semipermeable que permitía que la glucosa se difundiera hacia el interior del sensor y al mismo tiempo impedía que la enzima se difundiera hacia fuera. (Esta membrana se oponía también a la entrada de enzimas



1. AGUJA HIPODERMICA dotada de un biosensor desarrollado por el autor de este artículo para medir la concentración de glucosa existente en un fluido. La difusión de la glucosa en el seno del sensor desplaza a las moléculas de dextrano marcadas con fluoresceína de los lugares que ocupan sobre la pared interna del sensor. Una fibra óptica dirige la luz lasérica hacia el sensor para excitar el dextrano liberado; porta, asimismo, la señal resultante hasta el detector.

que pudieran degradar el biocatalizador.) Cuanto más glucosa entraba en el sensor, más oxígeno consumía la enzima. Las lecturas de oxígeno más bajas correspondían directamente a los niveles de glucosa más elevados.

El dispositivo de Clark nunca encontró aplicación en el control rutinario de los pacientes. Su precisión dependía estrechamente de la velocidad con que el oxígeno y la glucosa se difundían hacia el interior del sensor; esta velocidad de difusión podía variar en función del nivel de oxígeno en la sangre del paciente y como resultado de la formación de coágulos en la superficie del sensor. Pero el dispositivo sí trajo la base conceptual para el trabajo ulterior de Clark y otros: un sistema biológico sensible a determinados compuestos, un transductor físico que convertía los cambios químicos en una señal y membranas que separaban los elementos del sensor y los protegían del mundo exterior.

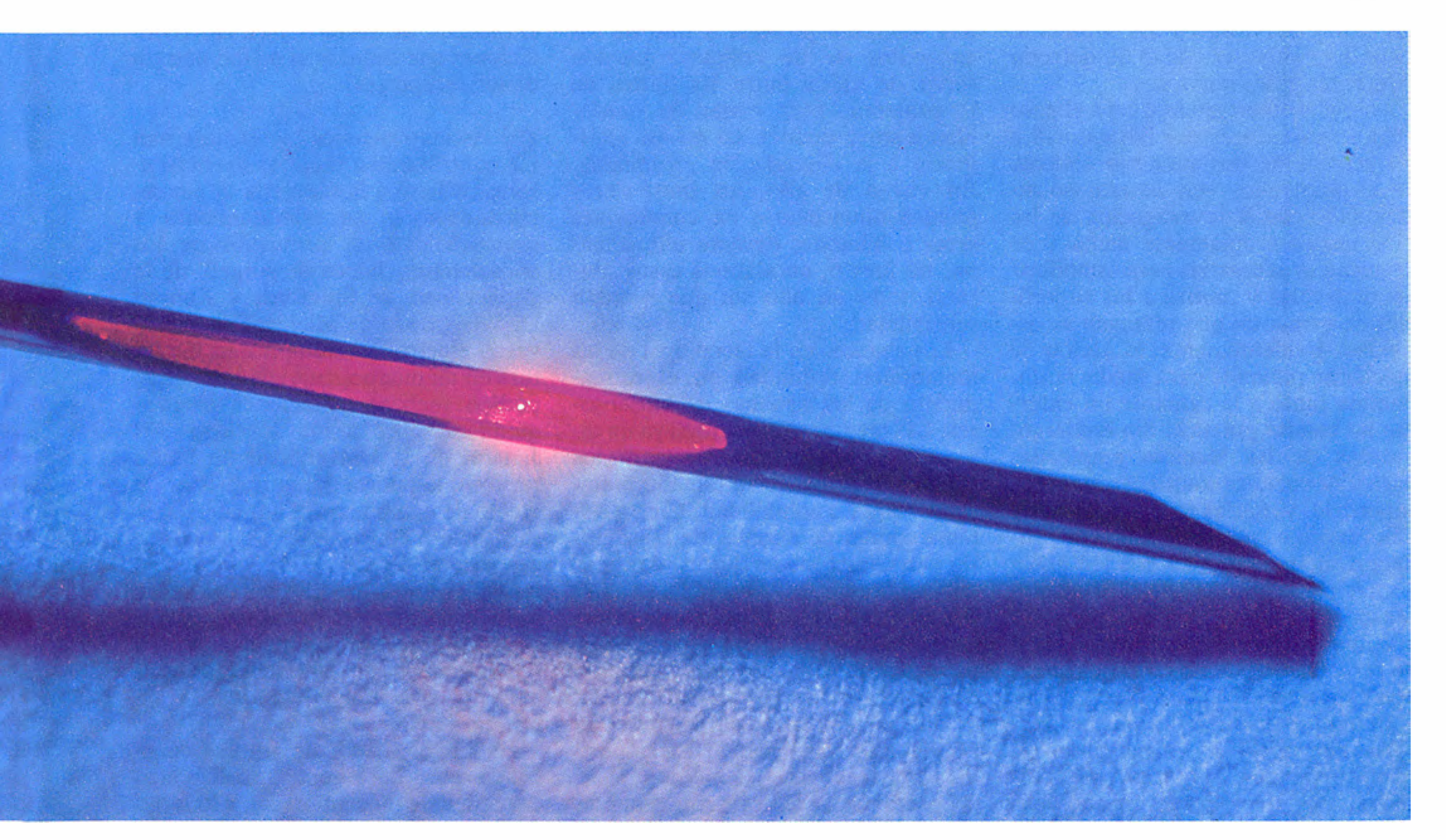
La siguiente innovación importante se produjo en 1969, cuando George G. Guilbault, de la Universidad estatal de Louisiana en Nueva Orleans, construyó un sistema capaz de medir el contenido de urea en los fluidos corporales. Este dispositivo utilizaba ureasa, enzima que convierte la urea en dióxido de carbono y amoniaco. Un electrodo detecta los cambios resultantes que se producen en la concentración de ion amonio. El sensor de Guilbault supuso un avance considerable, pues su funcionamiento se basaba en una detección potenciométrica, técnica que se ha utilizado ampliamente desde entonces.

El sensor de Clark medía la corriente que atravesaba el electrodo; el sensor potenciométrico, la diferencia de potencial que se necesita para mantener el flujo de corriente igual a cero. Este electrodo no consume ningún reactivo y, por tanto, resulta menos susceptible a los errores producidos por los cambios en las condiciones externas. Por otra parte, los sistemas potenciométricos poseen una curva de respuesta logarítmica y, en consecuencia, son capaces de medir concentraciones que difieran entre sí en un factor superior a cien.

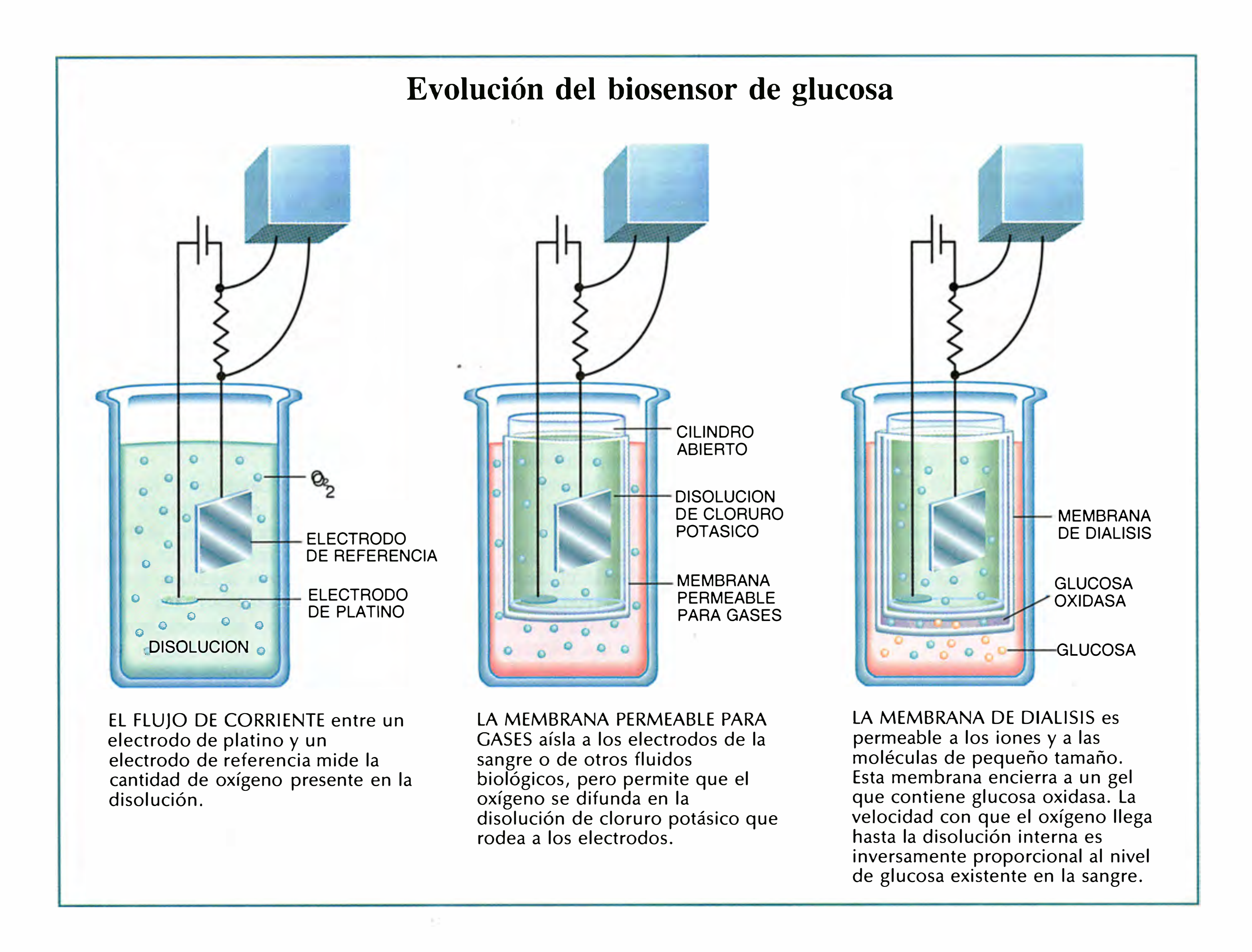
En las escasas décadas que han transcurrido desde el desarrollo de estos métodos electroquímicos, se han empleado un centenar de enzimas diferentes en los biosensores. Pero se ha descubierto que las enzimas no son los únicos biocatalizadores útiles. Recientemente, Garry A. Rechnitz, de la Universidad de Hawai, ha demostrado que las preparaciones de tejidos pueden transportar una secuencia compleja de reacciones que proporcionan una respuesta a los aminoácidos y otras moléculas de interés biológico. En ese sentido, se recurre a la pulpa de plátano para medir la dopamina; a los granos de maíz, para el piruvato; a la hoja de pepino, para la cisteína; a la remolacha azucarera, para la tirosina; al hígado de conejo para la guanina, y al tejido muscular de ese mismo animal para el monofosfato de adenosina.

Rechnitz ha ido aún más lejos en la asociación de sistemas biológicos: uno de sus sensores contiene una anténula o pequeño órgano sensor, procedente de un cangrejo azul de Maryland, diseccionado para exponer sus fibras nerviosas a un electrodo. Este sistema que se apoya en la anténula está capacitado para medir las concentraciones de un gran número de productos químicos y toxinas medioambientales.

El sensor de cangrejo y los dispositivos similares a él ofrecen la posibilidad de descifrar su estructura transmisora de información y permiten construir otros sensores más sencillos que incorporan las mismas moléculas. Estos sensores muestran también una serie de ventajas importantes: aunque enzimas y anticuerpos ofrecen un admirable poder de detección de determinados compuestos, otras biomoléculas podrían resultar más útiles para descubrir la presencia de cualquier miembro de una amplia serie de productos químicos. En este contexto, Richard F. Taylor, de la empresa Arthur D. Little, Inc., ha construido un sensor dotado de una membrana receptora para la acetilcolina, que transmite los mensajes de



Evolución del biosensor de glucosa



EL FLUJO DE CORRIENTE entre un electrodo de platino y un electrodo de referencia mide la cantidad de oxígeno presente en la disolución.

LA MEMBRANA PERMEABLE PARA GASES aísla a los electrodos de la sangre o de otros fluidos biológicos, pero permite que el oxígeno se difunda en la disolución de cloruro potásico que rodea a los electrodos.

LA MEMBRANA DE DIALISIS es permeable a los iones y a las moléculas de pequeño tamaño. Esta membrana encierra a un gel que contiene glucosa oxidasa. La velocidad con que el oxígeno llega hasta la disolución interna es inversamente proporcional al nivel de glucosa existente en la sangre.

las fibras nerviosas a los músculos. Este dispositivo es capaz de detectar diferentes gases nerviosos.

Un factor fundamental para el paso de los biosensores del laboratorio a los centros de uso rutinario consiste en el desarrollo —en general no relacionado con la investigación de los biosensores propiamente dicha— de las técnicas necesarias para estabilizar las moléculas y unirlas a las superficies de forma tal que retengan su actividad. Evidentemente, la acción de machacar plátanos para medir la dopamina junto a la cama de un enfermo no resulta práctica. Sin embargo, muchas de las técnicas empleadas para fijar enzimas o anticuerpos a una superficie, y usarlas así en ensayos de laboratorio o en la fabricación de productos bioquímicos, se pueden aprovechar para unir moléculas a un biosensor.

Aunque los procesos de separación de proteínas de su medio celular pueden alterar su estructura y exponerlas a un ataque químico, las mismas técnicas que fijan las proteínas a un sustrato tienden también a estabilizarlas. Por ejemplo, los mismos enlaces químicos que mantienen unida una molécula proteica a uno de los elementos de un polímero pueden servir de unión entre las partes de la proteína, para evitar su desdoblamiento y oponer así mayor resistencia a la degradación enzimática. En virtud de ello, los biosensores pueden almacenarse en condiciones secas o húmedas durante una semana, un mes o, en algunos casos, durante todo un año sin que pierdan sensibilidad.

Los avances en la tecnología de las membranas redundan en el refinamiento de los sistemas de biosensores. Las membranas admiten ya un diseño que les capacite para separar los solutos en razón de su tamaño molecular, carga o solubilidad. Cierto sistema común de ensayos de laboratorio tiene hasta media docena de capas de membranas, cada una de las cuales posee propiedades diferentes e incorpora reactivos distintos. Los avances recientes relacionados con el estudio de las bicapas de lípidos, que son similares a las bicapas de las paredes de las células vivas, pueden hacer posible la incorporación, en un biosensor, de proteínas receptoras procedentes de membranas celulares (tales como el receptor de acetilcolina), bajo condiciones que simulan el medio natural de los receptores.

Si las innovaciones biotécnicas han contribuido a mejorar los biosensores, débese a la industria de los semiconductores su abaratamiento y disponibilidad. A principios de los años setenta, James B. Angell, de la Universidad de Stanford, y Kensall D. Wise, de la de Michigan, construyeron electrodos múltiples en miniatura en un microcircuito de silicio que podían realizar mediciones electroquímicas sobre tejido nervioso. Jiři Janata, de la Universidad de Utah, recubrió la puerta de un transistor de efecto de campo con el anticuerpo de sustitución concavalina A (ConA); así nació el detector CHEMFET. Las investigaciones llevadas a cabo sobre todos estos dispositivos han permitido desarrollar técnicas generales para la incorporación de componentes químicos y circuitos integrados en un mismo sistema.

El primer sensor de glucosa construido por Clark tenía un diámetro del orden de un centímetro; a lo largo de esta última década, la utilización

de las técnicas de producción destinadas en su origen al desarrollo de circuitos integrados ha posibilitado la fabricación de electrodos sensores miniaturizados cuyo tamaño se cifra en centésimas de milímetro. Unos dispositivos equivalentes a los que emplean las impresoras por chorro de tinta implantan los reactivos y membranas en el extremo de los electrodos, según una disposición establecida de antemano, con finísima precisión. Estos métodos de fabricación permiten estampar miles o incluso millones de sensores idénticos con un coste por unidad bajísimo, lo que posibilita que los médicos desechen el sensor tras un solo uso para evitar el riesgo de contaminación.

Estos sensores baratos son también una bendición para los diabéticos, que deben controlar sus niveles de azúcar en sangre varias veces al día. Uno de estos sistemas, basado en el trabajo de Anthony P.F.Turner, del Instituto de Tecnología Cranfield, está constituido por una combinación de un sensor, amplificadores de circuito integrado y una pantalla de cristal líquido en un paquete del tamaño de una pluma estilográfica. Su enzima convierte glucosa en ácido glucónico, como sucedía en el sensor original de Clark; mas, a continuación, un mediador conocido con el nombre de ferroceno devuelve la enzima a un estado oxidante y a su vez es reactivado por la corriente que proporciona el mismo electrodo. Este monitor no consume ningún reactivo y opera durante periodos muy grandes.

El aumento en la oferta de electrodos sensibles químicamente posibilita sacarles partido a las reacciones enzimáticas que producen cambios en magnitudes distintas del acostumbrado *p*H o la concentración de oxígeno. Podemos colocar biosensores para diferentes sustancias en un mismo microcircuito integrado. Un médico podría introducir un catéter que contuviera esa pastilla ("chip") en la vena de un paciente y llevar a cabo medidas continuas de la química de la sangre u otros factores, de la misma forma que los instrumentos controlan actualmente el ritmo cardiaco, la presión sanguínea o la función cerebral.

Mientras unos se dedicaban a miniaturizar los biosensores electrónicos, otros desarrollaban sistemas completamente nuevos basados en los sensores ópticos. Los rápidos avances producidos en la industria de los semiconductores y las comunicaciones facilitaron el acceso a las fibras ópticas de bajas pérdidas, los circuitos para el procesamiento de señales ópticas, los desdobladores de haces integrados y filtros de longitudes de onda, así como a ciertas fuentes luminosas capaces de producir luz espectralmente pura, tales como diodos emisores de luz y láseres de estado sólido. En 1969, Gerald G. Vurek y Robert Bowman, del Instituto Nacional de la Salud, desarrollaron uno de los primeros sensores de fibra óptica para el análisis clínico, un colorímetro que medía la incorporación de colorantes en los túbulos del riñón. Las fibras ópticas pueden servir como espectrofotómetros para medir el espectro de reflexión o de transmisión de un fluido, como fluorímetros para detectar la reemisión de ciertas longitudes de onda de la luz, o como turbidímetros para medir la transparencia de los líquidos.

Existen tres grandes categorías de biosensores de fibras ópticas. La primera, una aplicación directa de las técnicas de los biosensores electrónicos, se limita a detectar los cambios que se producen en las propiedades ópticas de una sustancia blanco, más que en sus propiedades eléctricas. Las otras dos categorías se refieren a los dispositivos de onda evanescente y plasmón de superficie; se basan en la forma peculiar en que se produce la transmisión de luz a lo largo de las fibras ópticas.

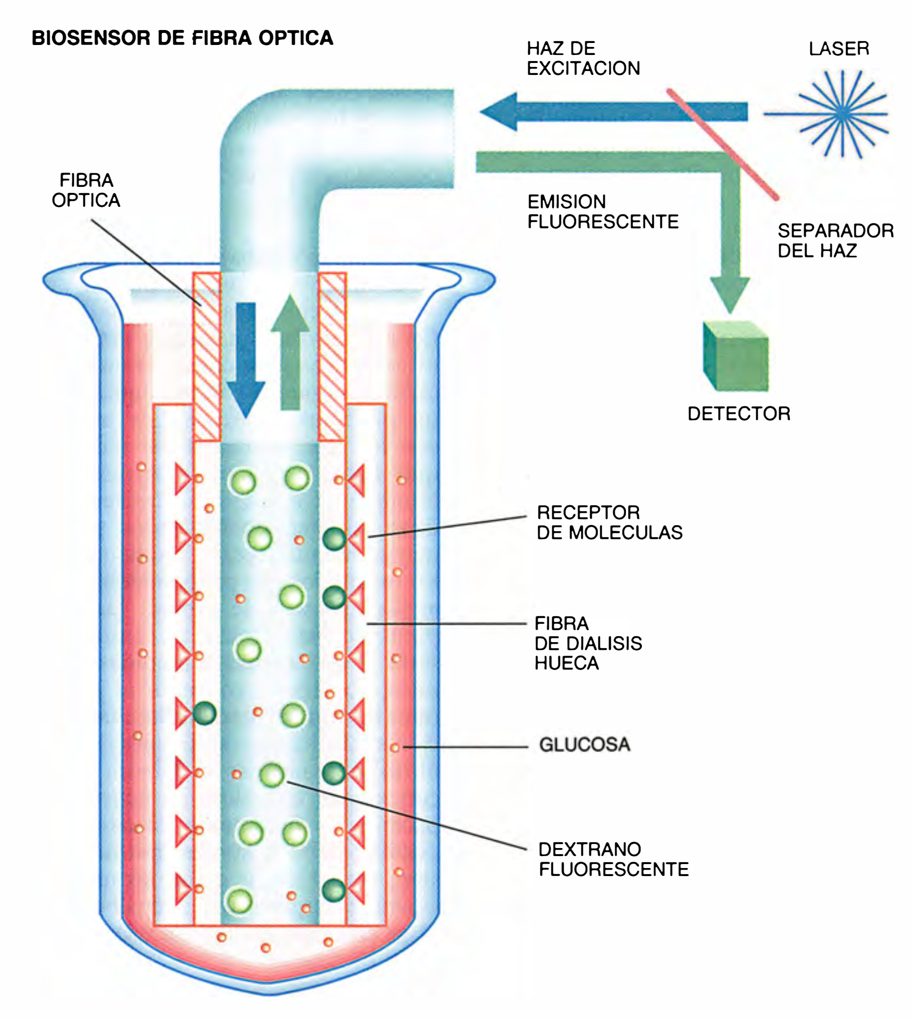
El primer tipo de biosensor óptico consta de una célula rodeada por una membrana semipermeable (los reactivos se encuentran en el interior de la membrana o están unidos a su superficie interna), una fibra óptica para iluminar la célula y unos detectores para medir los cambios en las propiedades ópticas. En la mayoría de los casos, una misma fibra transporta la luz que llega hasta la célula y recoge la luz transmitida o reflejada por ella para proceder a su análisis ulterior.

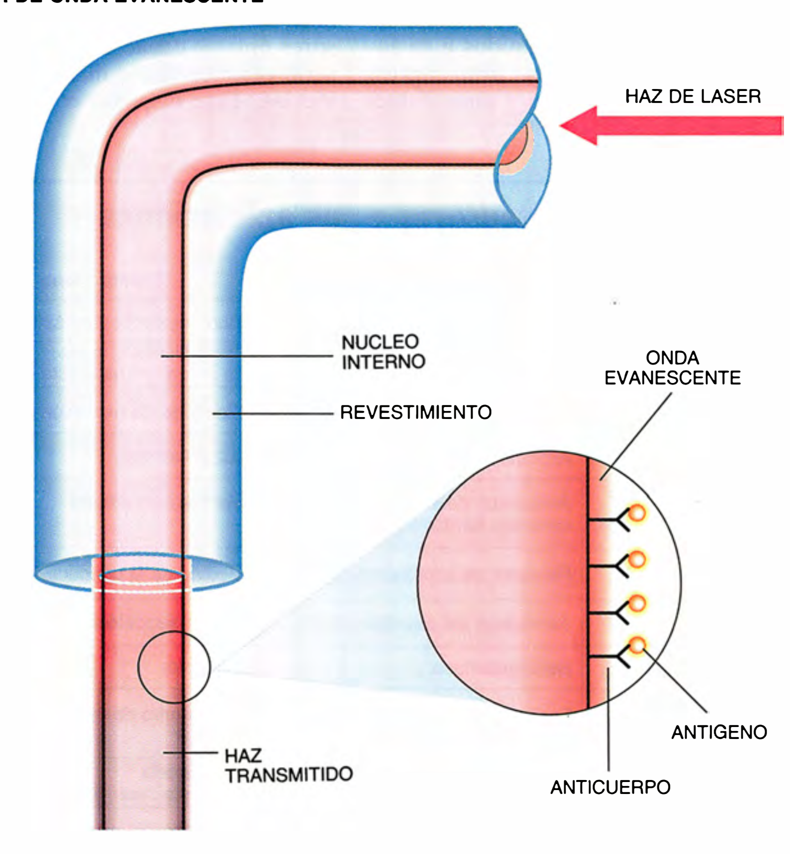
Mi propio trabajo como ingeniero bioquímico en diferentes proyectos relacionados con órganos artificiales me llevó a aplicar estas técnicas ópticas para construir un nuevo sensor de glucosa, idóneo quizá para un páncreas artificial. Los médicos con los que trabajaba me indicaron que había ya muchos sistemas de bombeo de insulina de excelente calidad, si bien debían todos programarse manualmente, ateniéndose a los resultados que proporcionaban los análisis previos de sangre. Desde el punto de vista clínico, un sensor ideal sería el que realizara medidas continuas; no debería consumir ni glucosa (con lo cual se acometería una medición auténtica en condiciones de equilibrio) ni reactivos; no debería poseer conexiones eléctricas al cuerpo del paciente; y finalmente, si ello fuera posible, debería ser de tipo no invasivo, con el fin de evitar las inflamaciones a largo plazo o cualesquiera otras reacciones que su presencia pudiera provocar.

El dispositivo construido por mí satisface la mayoría de estos requisitos clínicos, aunque no todos. Sirve, además, como arquetipo de los biosensores ópticos capaces de detectar una serie prácticamente ilimitada de moléculas. Este dispositivo está basado

Biosensores y sus aplicaciones

Sustancia medida	Sensor biológico	Sensor físico
Benzo(a)pireno	Anticuerpo del benzo(a)pireno	Fluorímetro de fibra óptica
Creatinina	Creatinina iminohidrolasa	Transistor de amoniaco de efecto de campo
Etanol	NADH y deshidrogenasa	Electrodo de oxidación-reducción
Gammaglobulina	Anticuerpo de la gammaglobulina	Luz polarizada
Lidocaína	Anticuerpo de la lidocaína y del complejo ferroceno-lidocaína	Electrodo de oxígeno
Gas nervioso	Receptor de acetilcolina	Medida de la conductividad
Paratión	Anticuerpo del paratión	Cristal piezoeléctrico
Penicilina	Beta-lactamasa	Termistor
Testosterona	Enzimas de bioluminiscencia: deshidrogenasa y luciferasa	Fluorímetro de fibra óptica
Teofilina	Anticuerpo de la teofilina	Resonancia en un plasmón de superficie
Vitamina B_{12}	Bacteria (*Escherichia coli*)	Electrodo de oxígeno



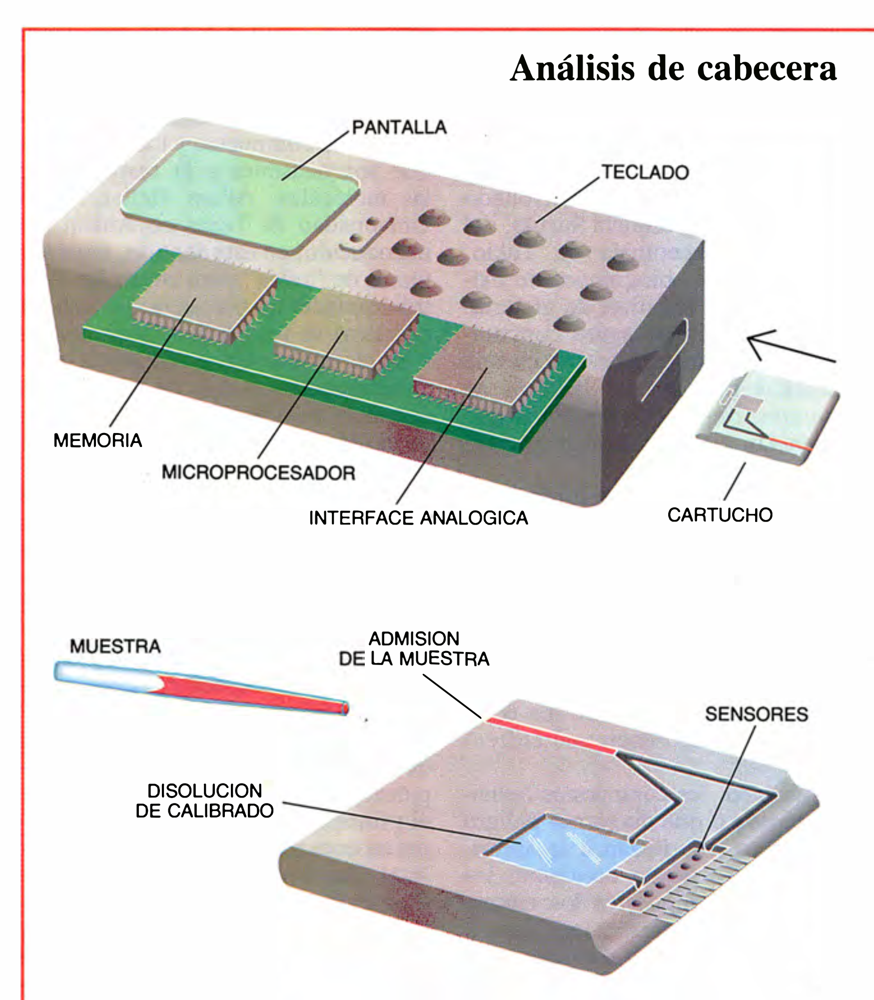


en la técnica de inmunoensayo de fluorescencia que se utiliza en los análisis clínicos. En nuestro caso, ConA, que se enlaza lo mismo con la glucosa que con el dextrano (un polímero de la glucosa), está colocada en el interior de una fibra de diálisis hueca, una membrana desarrollada originalmente para un riñón artificial. La fibra se rellena con una disolución diluida de dextrano marcado con fluoresceína. El complejo de dextrano no puede difundirse hacia el exterior; la glucosa, en cambio, sí puede difundirse hacia dentro. Conforme la glucosa va entrando en el sensor, desplaza al dextrano de algunos de los lugares que ocupa la ConA; cuanto mayor es la concentración de glucosa, tanto mayor es la cantidad de dextrano que se ve forzada a pasar a la solución. Entretanto, la luz transmitida a través de una fibra óptica da lugar a que el complejo de dextrano presente en la solución produzca fluorescencia y, como consecuencia, se origine una señal; el dextrano ligado a la ConA en las paredes de la fibra de diálisis no se encuentra en el camino de la luz, ni produce, pues, ninguna señal.

La fibra de diálisis, además de aportar un volumen aislado donde ocurra la reacción, conserva los reactivos. En un ensayo de laboratorio típico, el dextrano u otro marcador dotado de fluoresceína que se ve forzado a pasar a una solución se pierde. Por este motivo, la ConA (o un anticuerpo) no podría volver a usarse tras someterlo a una exposición directa de los fluidos corporales. La colocación de todo el sistema en un biosensor permite llevar a cabo medidas continuas y a largo plazo. El único talón de Aquiles residual que subsiste en

2. ESTE BIOSENSOR DE FIBRA OPTICA (*arriba*) contiene unas moléculas receptoras depositadas en la pared interna de una membrana de diálisis semipermeable y unas moléculas (dextrano) marcadas, fluorescentes y ligadas a los receptores. Cuando las moléculas de glucosa se difunden a través de la membrana, desplazan a las marcadas. Las moléculas desplazadas resultan atrapadas en la solución que existe en el interior de la membrana. Estas moléculas absorben la luz de láser difundida que entra en el sensor y producen una señal que es proporcional al número de moléculas sin marcar que han desplazado. Por otra parte, el funcionamiento de los sensores de onda evanescente (*abajo*) está basado en el hecho de que una parte de la energía que pasa a lo largo de una fibra óptica atraviesa los límites del núcleo de guía luminosa propiamente dicho. La presencia de determinados anticuerpos u otras moléculas adheridas a la superficie de una fibra óptica no recubierta por ninguna capa protectora facilita producir la captura del compuesto que se pretende detectar; en tal caso, se produce la absorción de una parte de la onda evanescente y, con ello, se origina una señal.

Análisis de cabecera



Este analizador portátil utilizado de forma rutinaria en el Hospital de la Universidad de Pennsylvania muestra de qué modo los biosensores pueden abrirse camino en usos clínicos. El llamado I-STAT-PCA es uno de los sistemas de biosensores susceptibles de empleo directo "junto a la cama de los pacientes". Este sistema mide simultáneamente seis magnitudes químicas presentes en la sangre (sodio, potasio, cloruro, urea, glucosa y hematócrito), proporcionando los resultados correspondientes a estas medidas en menos de dos minutos.

El PCA alcanza una precisión comparable a la de los equipos convencionales de laboratorio utilizando una bolsa desechable que contiene seis biosensores diferentes y una muestra de referencia para el calibrado. Un médico introduce 60 microlitros de sangre del paciente en esa bolsita. A continuación, el analizador lleva a cabo las medidas pertinentes tanto en la muestra de referencia como en la muestra de sangre del paciente. Da los resultados obtenidos y los almacena en memoria, junto con la hora en que las ha realizado y el nombre del paciente, para su análisis posterior.

este dispositivo es su carácter invasivo, es decir, la necesidad de que sea colocado en el interior de los tejidos para mantenerse en contacto con la sangre. Existe el riesgo de que, andando el tiempo, se produzca infección o inflamación; nadie ha descubierto todavía cómo conseguir que el cuerpo acepte sondas de este tipo durante largos períodos.

El segundo tipo de sensor óptico está basado en el método de la onda evanescente y no necesita hacer ninguna inferencia acerca del número de biomoléculas marcadas que resultan desplazadas desde un receptor en relación con el número de las que existen en la solución. Desde este punto de vista, parece ser una opción muy competitiva en comparación con el método de unión directa. El funcionamiento de los detectores de onda evanescente se apoya en el hecho siguiente: la energía de una onda luminosa transmitida a través de una fibra óptica no se mueve sólo a través del núcleo de la fibra, sino que parte de la misma atraviesa una región que se extiende unos 1000 angstroms en el medio que rodea el corazón de la fibra. Si eliminamos el recubrimiento protector de la fibra, cualquier material que se adhiera a su núcleo absorberá esa onda evanescente y emitirá fluorescencia.

Tomas B. Hirchsfeld, que trabajó en el Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore, ancló anticuerpos en la superficie de una fibra óptica desprotegida y midió la fluorescencia natural de los antígenos que estaban trabados en ellos. Los sensores basados en las ondas evanescentes miden el enlace competitivo del tipo utilizado en mi sensor de glucosa. Si se engarzan anticuerpos en la fibra y se añade una cantidad conocida de un antígeno marcado fluorescentemente y una sustancia desconocida, la cantidad de fluorescencia que produce la onda evanescente pone de manifiesto la relación entre los antígenos marcados y los antígenos sin marcar presentes en la muestra sometida a ensayo.

El dispositivo de plasmón de superficie, opción alternativa al método de onda evanescente, funciona por medio de una película de metal, plata por ejemplo, depositado sobre la superficie de una pieza delgada de vidrio que actúa como guía de la luz. La existencia de la película conductora proporciona un camino (el plasmón) para la energía luminosa y, por tanto, cambia el ángulo de incidencia crítico para el que la luz resulta atrapada en el interior del vidrio. El valor del nuevo ángulo crítico depende estrechamente de la cantidad de material adsorbido sobre la película metálica. La señal producida en un plasmón de superficie no hace necesaria la utilización de moléculas marcadas ni la realización de pruebas comparativas; si hay anticuerpos u otros biorreceptores unidos a ese aparato, mediremos con gran precisión la cantidad de material presente en una muestra de fluido que se ligue a tales receptores.

Dado que el método de plasmón de superficie no exige el uso de moléculas marcadas, puede aceptarse en la fabricación de biosensores para una serie muy amplia de sustancias. Pharmacia, una compañía del sector, ha creado un sistema dirigido a los laboratorios de investigación que contiene sensores específicos de plasmón

de superficie; sobre éstos se depositará cualquier biomolécula que se desee investigar.

Aunque el empleo de biosensores se concentra en las aplicaciones médicas, a largo plazo podrían abrirse a otros campos. El sensor desarrollado por Isao Karube y Shuichi Suzuki, del Instituto de Tecnología de Tokio, mide la demanda bioquímica de oxígeno, un índice del nivel de materiales orgánicos en las aguas contaminadas. El ingenio está basado en una levadura y proporciona lecturas en 30 minutos, frente a los cinco días que se necesitan en los métodos convencionales.

Podrían utilizarse sensores para controlar la presencia de bifenilos policlorados (BPC), hidrocarburos clorados, compuestos aromáticos y otras sustancias tóxicas. Ante un accidente, estos sensores suministrarían una respuesta inmediata y automática, informando a los equipos de emergencia de cuáles son exactamente los compuestos a los que tienen que enfrentarse.

Ahora bien, los compuestos químicos enojosos o que encierran peligro potencial no sólo llegan a la atmósfera por culpa de un accidente; los alimentos descompuestos los emiten también. Una empresa canadiense y otra japonesa venden biosensores que miden el nivel de xantina y otros compuestos presentes en el pescado con el fin de determinar su frescura. (En Japón, el índice de frescura del pescado se registra en el envoltorio.) Se trabaja ya en la preparación de biosensores para medir la calidad de la carne de ternera y otros alimentos.

Los procesos de control industrial definen otro campo de aplicación donde el empleo de biosensores ofrece perspectivas muy interesantes. Aunque existen detectores en las plantas de proceso químico automatizado para medir la presión, temperatura y acidez en tiempo real, los biosensores determinarían, además, la composición química de los materiales que intervienen en el proceso. Esa posibilidad reviste especial interés en el sector de la biotecnología, que, en general, no dispone de métodos precisos para controlar los cultivos de microorganismos en los fermentadores que sintetizan drogas o proteínas (interferón, insulina). La verdad es que el desarrollo de los biosensores podría actuar sinérgicamente: la mejora de las técnicas de fabricación conseguiría abaratar la producción de una serie más amplia de moléculas sensoras.

Ante la espectacular expansión del campo de aplicaciones, se comienza a abordar la posibilidad de una generación de sensores que eliminen las diferencias existentes entre las biomoléculas que son sensibles a un determinado compuesto y los electrodos que son sensibles a la respuesta de las moléculas. Adam Heller, de la Universidad de Texas en Austin, ha introducido, en este sentido, unos sistemas de "relés" para controlar electrónicamente las proteínas: los enlaces químicos se telegrafían directamente a un electrodo, en vez de medirse indirectamente a través de mediadores interpuestos o de cambios producidos en el *p*H, consumo de oxígeno u otras magnitudes. Esta técnica aumentaría notablemente la sensibilidad de los biosensores. Si, además, se lograra modificar las propiedades químicas de estas moléculas electroactivas, podrían fabricarse biosensores más selectivos.

Los biosensores serán siempre menos sensibles y específicos que los ensayos de laboratorio debido a las dificultades que presenta la fabricación de un instrumento que trabaja con rapidez y fiabilidad en el campo. Pero el principal enemigo de los biosensores se encuentra en la propia naturaleza. Con todo, salta a la vista, podremos construir muy pronto detectores más sensibles, más específicos y más rápidos en su respuesta que los propios organismos de los que derivan sus mecanismos moleculares.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FIBER-OPTIC SENSORS FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS. John I. Peterson y Gerald G. Vurek en *Science*, vol. 224, págs. 123-127; 13 de abril de 1984.

CHEMICAL SENSING IN PROCESS ANALYSIS. T. Hirschfeld, J. B. Callis y B. R. Kowalski en *Science*, vol. 226, págs. 312-318; 19 de octubre de 1984.

A MINIATURE OPTICAL GLUCOSE SENSOR BASED ON AFFINITY BINDING. Sohrab Mansouri y Jerome S. Schultz en *Bio/Technology*, vol. 2, n.º 10, págs. 885-890; octubre de 1984.

BIOSENSORS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS. Dirigido por Anthony P. F. Turner, Isao Karube y George S. Wilson. Oxford University Press, 1987.

BIOSENSORS. Garry A. Rechnitz en *Chemical and Engineering News*, vol. 66, n.º 36, págs. 24-31; 5 de septiembre de 1988.

IMMOBILIZED ENZYMES AND CELLS, Parte D. Dirigido por Klaus Mosbach. *Methods in Enzymology*, vol. 137. Academic Press, 1988.

MOLECULAR ELECTRONICS: BIOSENSORS AND BIOCOMPUTERS. Dirigido por Felix T. Hong. Plenum Press, 1989.

BIOSENSORS. Elizabeth A. H. Hall. Open University Press, 1990.

PRINCIPLES OF CHEMICAL SENSORS. Jiří Janata. Plenum Press, 1990.

Lobos de abejas

Las hembras de estos insectos son depredadores voraces, que cada año capturan muchas abejas para alimentar a sus crías. Los machos, muy agresivos, luchan entre sí para acceder a las hembras

Howard E. Evans y Kevin M. O'Neill

Vuela raudo. De repente, cambia de dirección. El lobo de abejas gira, se lanza en picado hacia un grupo de flores y se encamina hacia una abeja melífera que está sorbiendo néctar. Una vez el blanco está a su alcance, no pierde tiempo: el lobo de abejas se abalanza con las patas extendidas y, en menos de tres segundos, ha agarrado a su víctima y le ha inyectado una potente toxina paralizadora. Aferra a la abeja bajo su abdomen y sale volando hacia un nido subterráneo, donde la presa acabada de capturar se convertirá en comida para sus crías.

Encuentros espectaculares como el descrito se repiten, una y otra vez, a lo largo del estío, meses en que los lobos de abejas se manifiestan activos. Las agregaciones de estos insectos crean escenas vivísimas, con sus constantes idas y venidas y la riqueza de relaciones que se establecen entre ellos y sus presas, parásitos y depredadores. Tras haber pasado largos años dedicados a su contemplación, podemos afirmar que los lobos de abejas constituyen un objeto de estudio biológico muy recomendable.

Estos voraces insectos no son abejas ni lobos, sino avispas de la familia Esfécidos; su nombre refleja simplemente su afición por las abejas. Sólo las hembras cazan, y lo hacen con especial habilidad; sólo las larvas consumen otros insectos. Los adultos se alimentan exclusivamente de néctar, por cuya razón recibieron el nombre genérico de *Philanthus*, que en griego significa amante de las flores; un contraste total, efectivamente, con su nombre vulgar, más siniestro.

El etólogo Niko Tinbergen, que fue premio Nobel, popularizó el término "lobo de abejas" e inició los primeros estudios rigurosos de su comportamiento en los años treinta. De entonces acá hemos avanzado bastante en el conocimiento de la conducta de estos fascinantes animales. Figuran entre las avispas más frecuentes; aunque algunas especies son pequeñas (de siete a ocho milímetros de longitud), otras alcanzan los 22 milímetros. Muchas destacan por su vivo cromatismo, con bandas amarillas que atraviesan el abdomen, que facilita su distinción en el campo y resulta placentero a la vista. De las 136 especies de *Philanthus* identificadas, 34 viven en Norteamérica.

Para nuestra fortuna, varias medran en regiones naturales tan atrayentes como los parques naturales de Grand Teton y de Yellowstone, así como en las Great Sand Dunes del sur de Colorado, donde se han llevado a cabo muchas de nuestras observaciones. Abundan con mayor frecuencia en lugares menos exquisitos, incluidas las áreas urbanas, donde el suelo es desnudo y se desmenuza fácilmente. Cualquier punto presto a excavación subterránea (claros de bosque, laderas erosionadas, caminos de tierra, pozos de arena) puede ocultar un tapiz de nidos de los lobos de abejas.

Durante los últimos 15 años hemos pasado los veranos estudiando más de 20 especies diferentes y observando en condiciones naturales su rico comportamiento. Al emprender nuestra investigación buscábamos acotar las diferencias cualitativas entre especies; saber, por ejemplo, cómo divergían en cuanto a preferencias por las presas, comportamiento de anidamiento, estrategias de apareamiento y otras conductas.

Puesto que son las hembras las que construyen los nidos, ponen los huevos y cazan, hemos invertido la mayor parte de nuestro tiempo de campo dedicados a su observación. Pero, desde hace poco, hemos centrado nuestra atención en los machos, de los que ahora se sabe que poseen un repertorio etológico tan rico y complejo como el de las hembras. En ambos casos, el interpretar la conducta en términos de su adaptabilidad evolutiva nos ha proporcionado ratos de placer, mientras nos tenía planteado un reto intelectual persistente.

Antes de exponer los comportamientos exclusivos de cada especie, conviene tener delante el ciclo biológico básico y común a todos los lobos de abejas. Lo mismo que las demás avispas de la familia Esfécidos, los lobos de abejas excavan nidos en el suelo y depositan sus huevos en celdillas subterráneas abastecidas con insectos presa. Los adultos comienzan a salir de los nidos desde finales de primavera a finales de verano (según la especie de que se trate); no suelen vivir más allá de tres o cuatro semanas. Los machos aparecen unos cuantos días antes que las hembras y delimitan un pequeño retazo de terreno, o territorio, que vigilan celosamente ante intrusos. Cuando las hembras emergen, son atraídas a los territorios, donde ocurre la cópula. Tras el apareamiento, las hembras se aprestan a construir su nido o madriguera, lo que es un preludio necesario para la oviposición.

En todas las especies de *Philanthus* la madriguera consta de una entrada, un túnel principal y una serie de celdillas individuales, cuyo número va de sólo dos o tres hasta 17 o 18, según la especie. La hembra empieza excavando el túnel principal; procederá a cavar las celdillas, una a una, conforme vaya aportando las presas que rellenarán el hueco abierto.

HOWARD E. EVANS y KEVIN M. O'NEILL han colaborado a lo largo de más de 15 años en estudios sobre el comportamiento de los lobos de abejas. Evans es profesor emérito de entomología en la Universidad estatal de Colorado, que le contrató en 1973, cuando era conservador de himenópteros en el Museo de Zoología Comparada de la Universidad de Harvard. Ha escrito una docena de libros y más de 200 artículos sobre los insectos y su comportamiento. O'Neill, profesor de entomología en la Universidad estatal de Montana, recibió su grado de doctor por la de Colorado, donde estudió con Evans.

Cuando ha acabado el túnel principal, la hembra se embarca en su primera misión de captura de presas. A su vuelta al nido, deposita una abeja paralizada en el suelo del túnel; torna a salir en busca de nuevas presas. Al cabo de varios viajes de ésos (cada uno viene a durar entre cinco y 45 minutos), y una vez ha cobrado presas suficientes para llenar una celdilla (de cuatro a 20 insectos, en función de su tamaño), excava un primer pocillo, arrastra a sus paralizadas provisiones hasta su interior y después pone un huevo en la abeja más cercana a la entrada de esa celdilla. Inmediatamente clausura ese hueco con tierra, creando así una barrera para los intrusos; luego, procede a excavar otra celdilla.

El aprovisionamiento en masa de las celdillas efectuado así (en lugar de ir aportando, de manera progresiva, presas a las crías) sería imposible si no fuera por una notable cualidad del veneno del lobo de abejas. El veneno induce una parálisis profunda y permanente en los insectos, que los conserva eficazmente en un estado de animación suspendida y asegura a la larva un suministro fresco de alimento que la acompañe durante todo su desarrollo. Entre madre e hijo no se realiza ningún contacto ulterior; cuando el huevo hace eclosión (en un par de días), la larva empieza a devorar las presas de su celdilla. Comiendo rápidamente, alcanza el tamaño definitivo en una semana a 10 días; teje después un capullo, pasando el invierno bajo tierra, en su celdilla. Cuando emerja el adulto, llegada la primavera o el verano siguiente, se reanuda el ciclo.

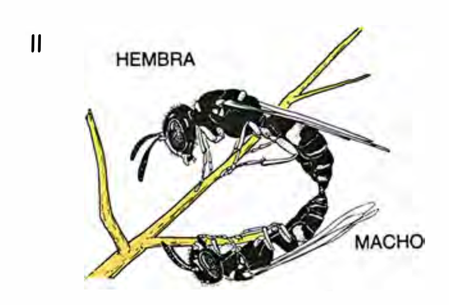
Las hembras tienden a agregarse. Forman, a menudo, lugares de anidación densamente poblados cuando hay poco suelo idóneo para la excavación. Vemos así dos o más especies ocupando el mismo lugar. El tapiz de nidificación más plural que conocemos se encuentra en el desierto de San Rafael, en Utah. Allí, en un período de tres días, recolectamos 10 especies en un trecho de camino de 15 kilómetros. Grado tan alto de superposición podría inducirnos a pensar en una correlativa intensidad de la competencia por los recursos; la verdad es que hemos observado que las especies que ocupan el mismo lugar suelen poseer períodos de actividad, preferencias de presas o tamaños corporales diferentes (estos últimos acompañados por la correspondiente diferencia en tamaño de presas).

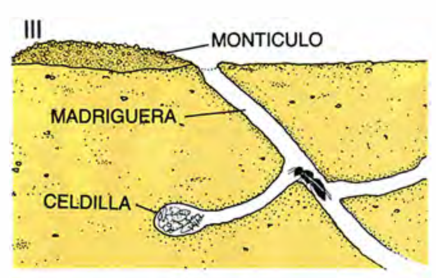
Por citar un ejemplo: de cuatro especies que encontramos anidando juntas en la zona central de Colorado septentrional, dos estaban muy pola-



1. LOBOS DE ABEJAS EN COPULA: una pareja de *Philanthus bicinctus* cuelga de la vegetación (en este caso, de una planta de bistorta) que crece en el territorio del macho, o en su vecindad. El macho, después de haber puesto en contacto su genitalia con la de la hembra, se mantiene acoplado, en posición colgante y cabeza abajo, durante unos cinco minutos, antes de separarse.



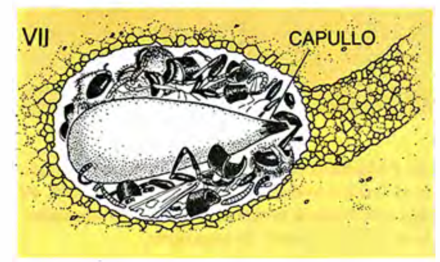












rizadas en su elección de la presa, mientras que las otras dos eran generalistas: *Philanthus inversus* capturaba sólo machos de abejas del sudor (así llamadas porque son atraídas por el sudor humano y animal); *P. bicinctus* depredaba sólo abejorros (con lo que se la ha dado en llamar lobo de abejorros); *P. barbiger* y *P. basilaris*, por contra, convertían en presa a casi cualquier tipo de abeja o de avispa que les saliera al paso. Ahora bien, estas dos últimas divergen bastante en tamaño corporal, razón por la cual sólo ocasionalmente se las ha visto atacando la misma presa. En resumen: aun cuando cuatro especies compartían el mismo hábitat, ninguna de ellas competía de manera significativa con las demás.

Una segunda peculiaridad de los lugares de anidación de los lobos de abejas (relacionada, en nuestra opinión, con su escasez global) es la de su longevidad. Que los individuos vivan, todo lo más, de tres a cuatro semanas, no impide que esos subsuelos se hallen ocupados generación tras generación. Por recordar un par de muestras, los lobos de abejas han venido instalándose en cierto nido de Yellowstone durante al menos 30 años y otro en Grand Teton durante más de 23 años. Ahora bien, sólo en *P. gibbosus* las mismas madrigueras son reutilizadas por generaciones sucesivas.

Pero la especificidad de los lugares de anidamiento tiene su precio. A lo largo de las generaciones, depredadores y parásitos se van atrincherando en esos subterráneos. La verdad es que quienes estudian *in situ* la conducta de los lobos de abejas se ven sorprendidos de inmediato por dos fenómenos: la ubicuidad de sus parásitos y las diversas estrategias que los esfécidos emplean para librarse de ellos.

El observador advierte en seguida la presencia de determinados tipos de moscas y de avispas parásitas que abundan en los lugares de anidamiento. Las tasas de parasitismo son elevadas, llegando hasta el 40 por ciento en algunos sitios, dato que podría explicar buena parte de la multiplicidad de comportamientos que se descubre en *Philanthus*. Sin discusión, los enemigos naturales más abundantes de los lobos de abejas son los cleptoparásitos, así llamados porque depositan sus larvas recién eclosionadas en las presas paralizadas del lobo de abejas, con lo que las roban efectivamente (sólo después devorarán el huevo del lobo de abejas). La eficacia con la que los cleptoparásitos atacan a las presas tiene que ver, en buena medida, con su tipo de desarrollo, bastante insólito. Son larvíparos, es decir, las hembras paren larvas (queresas), eclosionadas de huevos en el mismo interior del tracto genital de su madre y depositadas después en la presa de un lobo de abejas, dispuestas a empezar a comer.

El cleptoparásito norteamericano más importante es, probablemente, la mosca satélite *Senotainia*, que revolotea alrededor de las hembras de *Philanthus* cuando retornan al nido. La mosca despliega una estrategia sencilla: cuando el lobo de abejas se detiene en la abertura del nido, la mosca satélite se abalanza hacia ella y, en cuestión de milisegundos, deposita una pequeña queresa en la presa paralizada.

Otras moscas cleptoparásitas son buscadoras de agujeros: van a la caza de aberturas de nidos en el suelo, y después penetran directamente en el túnel (*Metopia*), o bien se abren camino a arañazos a través de la clausura del nido (*Phrosinella*), depositando sus queresas en presas que ya se hallan en la celdilla.

Dos grupos de avispas parasitan también los nidos de los lobos de abejas: las "hormigas" aterciopeladas (avispas ápteras) pertenecientes a la familia Mutílidos y las avispas cuco de la familia Crisídidos. También ellas son buscadoras de agujeros.

Ante tal presión de selección, los lobos de abejas han desarrollado varias estrategias interesantes para engañar o dificultar la acción de sus enemigos. Algunas especies, por ejemplo, alisan una y otra vez el montículo de tierra excavada en la entrada del nido, para que se confunda con el entorno. Otras cierran la abertura del nido cuando se van, bloqueando la entrada de las moscas *Metopia*. Por desgracia, esta última táctica tiene sus costes: puesto que la hembra debe detenerse para extraer la clausura cuando vuelve al nido, se le ofrece tiempo suficiente a *Senotainia* para poner una queresa sobre la presa del lobo de abejas.

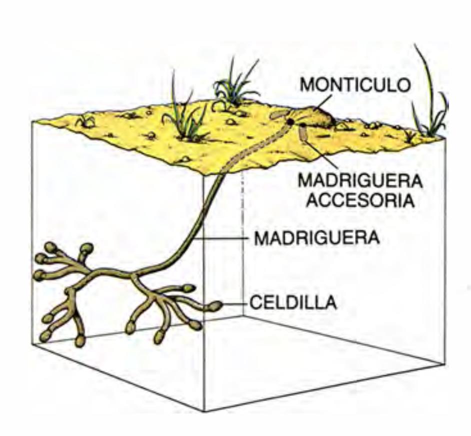
2. CICLO BIOLOGICO de los lobos de abejas. Ocurre su inicio en cualquier momento desde finales de primavera hasta finales de verano, según la especie. Los machos son los primeros en emerger (*I*) y se aparean unos días más tarde, cuando aparecen las hembras (*II*). Después de aparearse, una hembra construye la madriguera subterránea (*III*) en la que depositará sus presas y en la que pondrá los huevos, sellando luego la entrada cuando se marche (*IV*). Uno o dos días después de poner un huevo, la larva hace eclosión y comienza a devorar a sus presas (*V*). Transcurrida una semana, cuando la larva alcanza su tamaño definitivo (*VI*), teje el capullo (*VII*), en el que pasará el invierno y se metamorfoseará en adulto.

Varias especies han adoptado una estrategia encaminada a disuadir lo mismo a *Senotainia* que a *Metopia*: excavan entradas falsas o accesorias de la madriguera, para que dejen en ellas huevos o larvas. No hemos sometido todavía a prueba la hipótesis de que las falsas madrigueras reduzcan las tasas de parasitismo, pero sí podemos asegurar que las moscas *Metopia* son fácilmente atraídas a los agujeros que hacemos en el suelo con un lápiz o un clavo. También sabemos, a partir de las investigaciones realizadas en otras especies de avispas que anidan en el suelo por Katsuji Tsuneki (recientemente jubilado de la Universidad Fukui, en Japón), que las tasas de parasitismo varían en función de la presencia o ausencia de madrigueras accesorias. En cierta localidad nipona, donde cohabitan dos especies, la que siempre excava madrigueras accesorias sólo tenía un 9 por ciento de parasitismo, mientras que la que no lo hacía sufría hasta un 44 por ciento.

Otra estrategia que disuade manifiestamente a los parásitos es la del vuelo evasivo. Las hembras acostumbran volar de forma errática cuando se acercan a su nido, táctica que parece servirles para zafarse de los perseguidores. Las maniobras de vuelo difieren en función de la especie, con paradas súbitas en pleno vuelo, aterrizajes abortados, descensos en picado y vuelo irregular. David McCorquodale, de la Universidad de Alberta, estudió los vuelos de acercamiento de seis especies de avispas excavadoras (dos de ellas lobos de abejas) y halló que las que presentaban las maniobras de vuelo más complicadas eran también las que eludían con mayor éxito a sus atacantes.

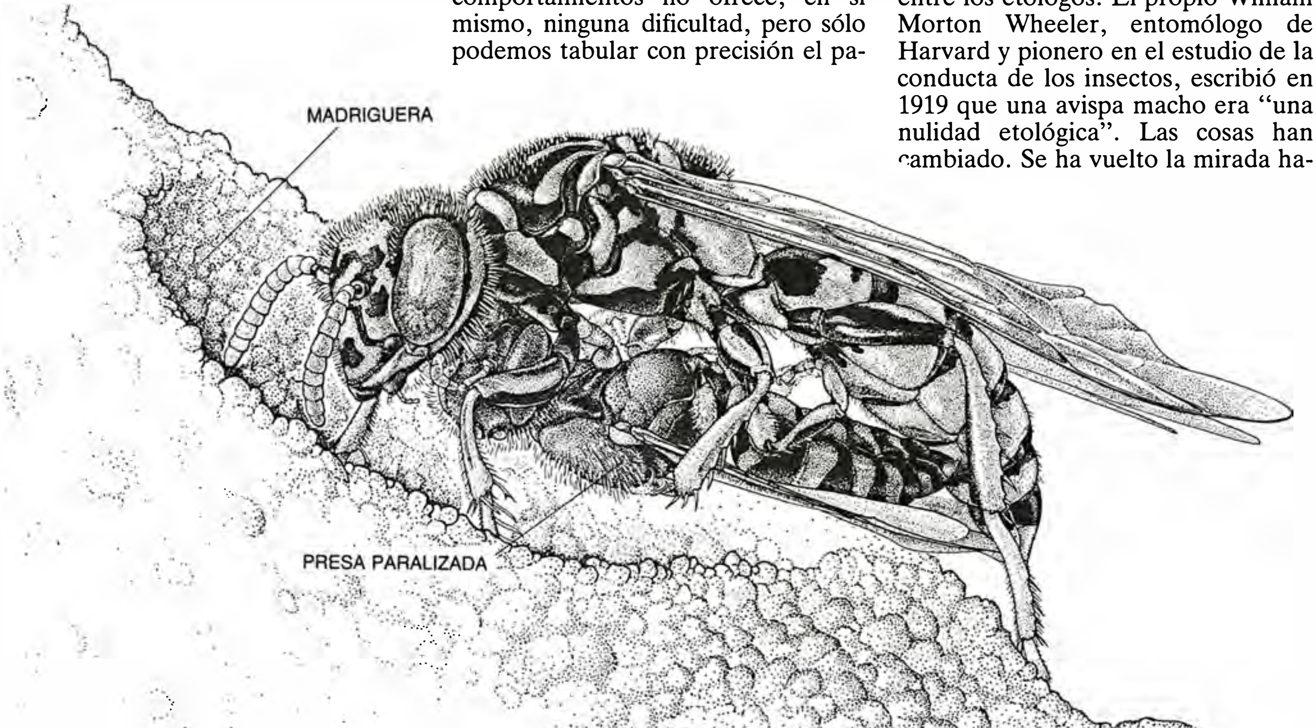
Cierto es, pues, que la nidificación agregada favorece la acumulación progresiva de poblaciones de parásitos. Pero no lo es menos que aporta a los lobos de abejas una ventaja defensiva, al reducir la probabilidad de que un individuo determinado sea parasitado. A esa resolución llegó William T. Wcislo, de la Universidad de Kansas, que estudió tasas de parasitismo en una agregación de avispas que anidan en el suelo en Michigan; los individuos, concluía, se prestan mutuo beneficio al fiar su seguridad en el número, siguiendo en esto la hipótesis del "rebaño egoísta", de William D. Hamilton, de la Universidad de Oxford.

Hemos de reconocer que el grueso de las pruebas que ponen en relación los comportamientos de anidación con la presión de selección que proporcionan los parásitos es circunstancial. Para demostrar con rotundidad la existencia de esa correlación, necesitamos acumular más datos sobre el porcentaje de celdillas parasitadas en una población y compararlo con la preponderancia de comportamiento antiparasitario que exhiben las avispas de dicho grupo. El registro de los comportamientos no ofrece, en sí mismo, ninguna dificultad, pero sólo podemos tabular con precisión el parasitismo excavando cada madriguera y permitiendo el desarrollo del contenido de sus celdillas; ello nos dará el número de descendientes supervivientes.

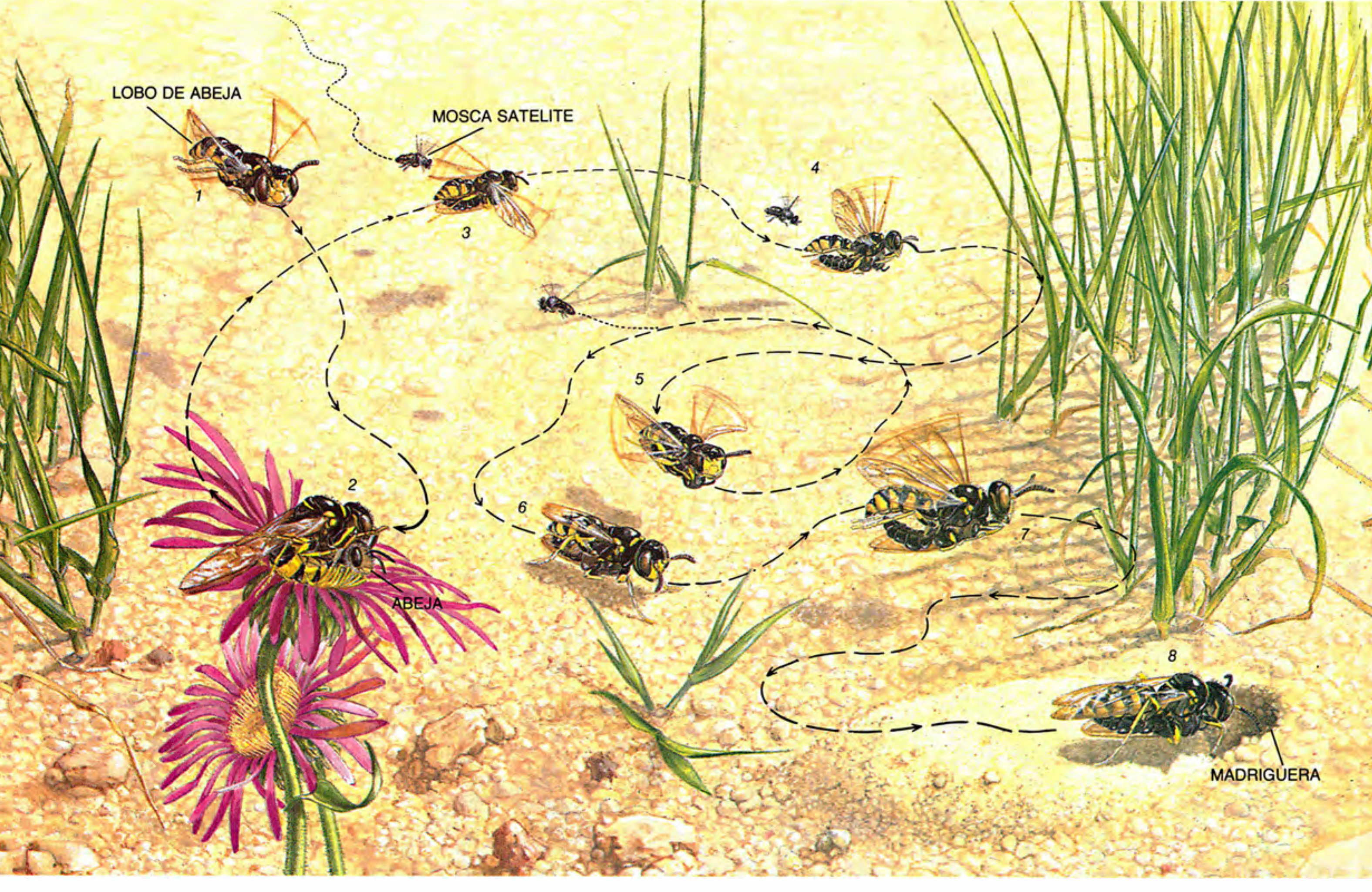


3. LAS MADRIGUERAS SUBTERRANEAS varían de una especie a otra, lo que no es óbice para que cumplan un patrón común: suelen constar de una única abertura, un túnel principal y un grupo de celdillas, que difieren en cuanto a número y disposición. Un montículo y una o más madrigueras accesorias (que sirven para disuadir a los parásitos) pueden estar presentes en la abertura del nido.

Tenemos centrada ahora nuestra atención investigadora en el repertorio conductual de los machos, mucho más amplio y complejo de lo que se había sospechado. Y es que durante muchos años se pensó que se limitaban a copular con las hembras, por lo que despertaron escaso interés entre los etólogos. El propio William Morton Wheeler, entomólogo de Harvard y pionero en el estudio de la conducta de los insectos, escribió en 1919 que una avispa macho era "una nulidad etológica". Las cosas han cambiado. Se ha vuelto la mirada ha-



4. ABEJA PARALIZADA, *Agapostemon texanus*, transportada por una hembra de *Philanthus inversus*. El lobo de abejas (dibujado aquí a punto de entrar en su nido subterráneo) mantiene a su presa, que mide nueve milímetros de longitud, contra su cuerpo, con lo que la protege de posibles depredadores. El lobo de abejas, que mide 12 milímetros de longitud, es sólo un poco más largo que su víctima.



5. LAS PAUTAS DE VUELO DE LAS HEMBRAS les ayudan a alejar el peligro de depredadores y parásitos, como las ubicuas moscas satélite, que persiguen agresivas a los lobos de abejas cargados con una presa. Una vez una hembra de lobo de abejas divisa a una abeja (1) y la paraliza (2), retorna al nido (3), maniobrando para zafarse de sus enemigos (4). Las tácticas, que pueden incluir volar en círculos (5), detenerse (6) y acelerar bruscamente (7), varían de una especie a otra. Si tiene éxito, la hembra llega a su nido (8) después de haber perdido a su perseguidor.

cia el denostado macho, un merecido tributo a la gama, sorprendentemente amplia, de actividades del animal.

A diferencia de las hembras, que invierten mucho en su descendencia y pasan la mayor parte de su vida buscando presas con las que aprovisionar sus nidos, los machos contribuyen con poco más que los genes a su progenie. En cambio, gastan mucha energía buscando pareja. Cuando no están ocupados en estos quehaceres, van a la busca de néctar; por la noche y cuando el rigor del tiempo lo demanda, duermen en madrigueras someras. Aunque raramente se relacionan con hembras o con otros machos en su primera salida del nido (se dedican a alimentarse), modifican su comportamiento de forma espectacular mediada la mañana o hacia el final de la misma, momento en el que empiezan a buscar posaderos específicos en el suelo o en la vegetación baja, desde donde provocar a las hembras. Una vez ha encontrado un posadero y establecido así un territorio, el macho pasa entonces de dos a seis horas a la espera de la llegada de una hembra. Durante todo ese tiempo, apenas se alejará unos pocos metros de su posadero.

El apareamiento propiamente dicho dura poco. Se inicia cuando una hembra penetra en el territorio de un macho; consciente de su presencia, éste abandona rápidamente su posadero e intenta colocarse sobre el dorso de su pareja en potencia. Si se le muestra receptiva, acoplan sus genitalias y dan un giro hasta que se hallan encarados, frente a frente. El encuentro dura unos cinco a 10 minutos, tiempo durante el cual la pareja puede realizar un breve vuelo en tándem antes de aterrizar y desacoplarse. El macho retorna a su posadero, dispuesto a perseguir a otras hembras.

En esa fase, los machos son muy territorialistas y reaccionan hostilmente ante cualquier intruso, sobre todo si se trata de otros machos de la misma especie. Quienes se acercan hasta un metro del posadero son perseguidos y con frecuencia huyen. Pero puede ocurrir que el macho intruso pretenda quedarse con el territorio ocupado. Se produce entonces un combate feroz, en el que los machos luchan en el suelo o entrechocan audiblemente sus cabezas mientras vuelan. Se enzarzan también en combates sin contacto, en vuelos circulares o en rizos de uno alrededor del otro, a velocidades vertiginosas.

Para determinar qué factores influyen sobre el resultado de una disputa territorial, capturamos varios machos de distintos lugares de estudio de las montañas de Colorado; tomamos medidas de la longitud del cuerpo y les marcamos con una señal distintiva en el tórax, o sección media. El control subsiguiente de sus movimientos nos confirmó lo que era de presumir: el resultado de una batalla guardaba estrecha relación con la diferencia de tamaño entre residente e intruso. Del 97 al 100 por ciento de los ganadores de los combates (en las cuatro especies que estudiamos: *P. inversus, P. bicinctus, P. barbiger* y *P. basilaris*) eran mayores o de igual tamaño que sus contrincantes. Los machos mayores se libran de numerosos intrusos al día y pueden mantener su territorio durante dos o tres semanas, lo que supone una importante fracción de su vida.



6. ENERGICA DEFENSA DEL TERRITORIO por parte de los machos. Pasan gran parte del tiempo posados (1), pero reaccionan inmediatamente frente a cualquier intruso, en especial las hembras y otros machos de la misma especie. Los combates entre machos son feroces: entrechocan sus cabezas de forma audible a cierta altura del suelo (2) y luchan sobre éste. Los machos marcan la vegetación (3) con un olor que se piensa atrae a las hembras hacia su territorio, por lo que vale la pena defenderlo. El apareamiento suele tener lugar en la vegetación inmediata (4).

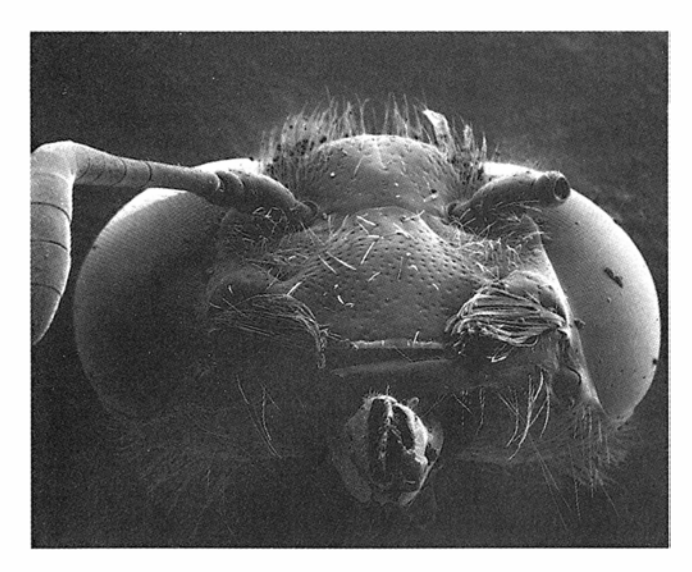
La capacidad de establecer y mantener el control sobre un territorio contribuye al éxito reproductor de un macho. En cualquier momento puede, sin embargo, verse volar un gran número de machos, los flotadores: van de un territorio a otro intentando desplazar a sus ocupantes. En coherencia con nuestra investigación anterior, de la que se desprendía que el éxito en la batalla se apoyaba en el tamaño, postulamos que los flotadores serían, por término medio, más pequeños que los machos asentados en su propio territorio. Para corroborar tal hipótesis, sacamos de sus posaderos algunos machos y los medimos. Repetimos ese proceso con los flotadores que los sustituyeron (a menudo, en pocos minutos). En el 94 por ciento de los casos, el macho que reemplazaba al propietario del territorio fue menor que éste, lo que consolida la idea de que el tamaño determina si un macho establece o no un territorio.

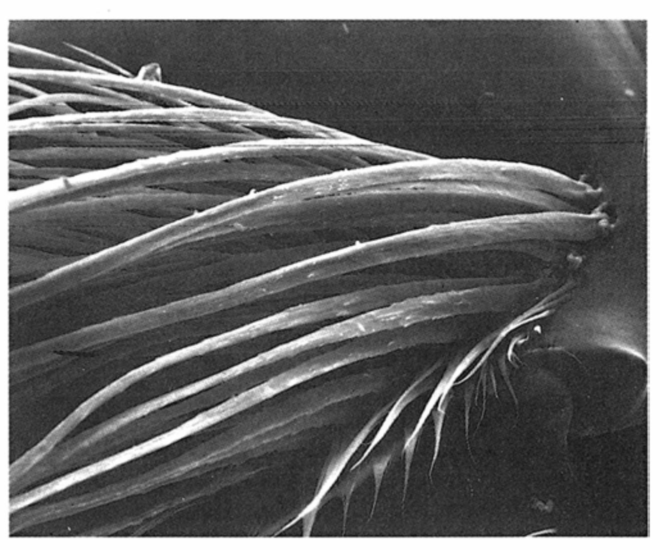
No debe sorprendernos que los machos se muestren muy prevenidos cuando se hallan en su posadero. Persiguen, a lo largo de un metro o más, a flotadores, mariposas, pájaros e incluso a guijarros que les tirábamos. Situación de alerta que tiene sus costes: los machos activos atraen a veces la atención de los depredadores. Por ejemplo, las rapaces moscas salteadoras ocupan los mismos hábitats que los lobos de abejas y con frecuencia se las ve atacando a los machos. Y hemos visto hembras de lobos de abejas arremeter contra machos de su propia especie, aunque ignoramos la razón de esa conducta extraña.

Hay otra especie que se singulariza por apartarse de la pauta básica de comportamiento del macho que acabamos de describir. En el verano de 1977, iniciamos un estudio, de cuatro años de duración, centrado en una población de *P. zebratus* en Jackson Hole, Wyoming. Encontramos que los machos más pequeños establecen posaderos periféricos a la densa agregación de nidos. Los machos mayores, en cambio, renuncian a la territorialidad y se dedican a una táctica alternativa: realizan largas rondas y barren los lugares de anidación volando a una altura de tres a cinco metros sobre ellos. Ignoramos por qué este comportamiento se da sólo en dicha especie.

Mantener el territorio propio es esencial para el éxito reproductor. Con todo, nos preguntamos por el motivo de una defensa tan vigorosa de las parcelas propias. ¿Qué atributos podían poseer estos lugares para que valiera la pena conservarlos o, a la inversa, robarlos? En *P. psyche* y *P. bicinctus*, los machos defienden territorios en el interior de las áreas de anidación donde las hembras receptivas deben ser más abundantes, pero esta pauta no es universal. En otras especies, los machos defienden lugares distintos del área de anidación o bien se hallan en una región donde los nidos están ampliamente dispersos. Además, los territorios de los machos no contienen ninguna concentración especial de recursos (alimentos, por ejemplo) que las hembras requieran, ni parecen ser corredores de paso de las hembras.

El valor del territorio que el macho defiende puede proceder en primer lugar de una de sus actividades más conspicuas. Los machos que se sitúan







7. CABEZA DE UN MACHO de *Philanthus gibbosus*, según aparece en una micrografía (*izquierda*), aumentada unas 30 veces. Sobre la boca, entre los dos ojos compuestos, distínguense los pinceles clipeales, utilizados para aplicar feromonas sexuales a la vegetación. Cuando se observan a un aumento de 130 veces (*micrografía de la derecha*), se advierte que los pinceles son haces de pelos.

en un posadero se libran a un comportamiento insólito y muy ritualizado: inmediatamente después de seleccionar un posadero, cada macho hace incursiones a los tallos de las plantas vecinas. Después de posarse en un tallo, trepa un trecho corto y luego vuelve sobre sus pasos, presionando cabeza y abdomen contra el tallo. La frecuencia con la que los machos se dedican a este comportamiento varió desde aproximadamente una vez cada 20 segundos en las especies menores, como *P. barbiger*, a una vez cada cinco minutos en las mayores, como *P. basilaris*. Esta actividad recuerda el comportamiento de marcar mediante olor de otros insectos. ¿Acaso los machos aplicaban algún tipo de sustancia química a la vegetación?

Con la ayuda de varios químicos (Justin O. Schmidt, Henry M. Fales, Chris A. McDaniel y Ralph W. Howard), llegamos a la conclusión de que los machos marcaban los tallos de las plantas con sustancias químicas. Nos fundábamos en varios datos cruciales; para empezar, en la observación de la presencia de sustancias volátiles, segregadas por las glándulas mandibulares engrosadas de los machos, en los tallos visitados. No había traza alguna de estas sustancias en las plantas que no habían recibido esa visita. Sospechábamos, además, que los pelos surcados longitudinalmente, formando cepillo, y situados cerca de la base de las mandíbulas del macho podían aportar el medio mecánico para la aplicación del aroma; en el mismo sentido, los pelos abundantes y difusos del abdomen del macho podían ayudar a esparcir el olor cuando aquél presiona su abdomen contra el tallo.

En esta misma línea argumentativa del papel prominente que las sustancias químicas desempeñan en el comportamiento del macho, aduzcamos una prueba circunstancial: glándulas mandibulares engrosadas y cepillos pilosos de la cabeza y abdomen de los machos de *Philanthus* no sólo faltan en las hembras de lobos de abejas, sino también en *P. albopilosus*, única especie cuyos machos no arrastran, que se sepa, su abdomen sobre la vegetación.

Avanzando un paso más, la composición molecular de las secreciones de la glándula mandibular sugiere que las sustancias químicas implicadas pudieran ser feromonas sexuales; estas moléculas atraen a miembros del sexo opuesto y sirven de componentes críticos del comportamiento de apareamiento de muchos animales. Los extractos de la glándula mandibular de dos especies que estudiamos a este propósito, *P. basilaris* y *P. bicinctus*, revelan una mezcla, exclusiva de cada especie, de cetonas, ácidos grasos, ésteres etílicos y aldehídos, todos los cuales tienen pesos moleculares típicos de las feromonas de insectos.

Aunque todavía hemos de confirmar experimentalmente que las hembras reaccionan al olor del macho, hemos observado su comportamiento de vuelo cuando se acercan a los machos de los posaderos, antes del apareamiento. En todos los casos, vuelan directamente contra el viento, en una trayectoria a menudo zigzagueante. Pauta de vuelo que es la típica de los insectos que se orientan frente a olores transportados por el viento desde una sola fuente olorosa. Ello no obstante, para probar de forma tajante la respuesta de las hembras al extracto mandibular del macho, habrá que proceder a experimentos controlados donde, expuestas ante diferentes olores, se analicen sus reacciones.

Creemos, sin embargo, que las feromonas ofrecen una pista importante para explicar la evolución del territorialismo en los lobos de abejas. Los machos se benefician, opinamos nosotros, al defender los lugares delimitados por la deposición de las feromonas, acción que ha transformado una parcela indefinida en zona atractiva para las hembras. Por su parte, el macho que usurpa un territorio marcado con olor obtiene la posesión de plantas marcadas sin tener que aumentar los costes de fabricar la feromona. Esto podría explicar por qué muchos se empeñan en robar territorios al despertar el día, aun cuando haya zonas vecinas por ocupar.

Para los que pasamos las cálidas tardes estivales embelesados por las idas y venidas de los lobos de abejas, éstos son animales fascinantes y cautivadores. Para muchos otros, por desgracia, se trata de plagas indeseables. No sólo capturan abejas que polinizan flores silvestres y plantas de cultivo, sino que también matan avispas que hacen presa en orugas y saltamontes, animales perjudiciales para la agricultura. Además, los lobos de abejas crean problemas ocasionales en los apiarios. R. T. Simonthomas, que acaba de jubilarse en la Universidad de Amsterdam, estima que 3000 hembras de lobos de abejas (un tamaño de población que no es insólito) podrían capturar unas 30.000 abejas melíferas al día. La densidad de lobos de abejas en el oasis egipcio de Dakhla es tal, que, señala, la apicultura se hace allí imposible.

A propósito de la voracidad depredadora de los lobos de abejas, se nos ha preguntado por la posibilidad de que controlasen eficazmente las poblaciones de las abejas "asesinas" africanizadas que amenazan a los Estados Unidos meridionales. A ello conviene responder, de entrada, que las avispas que anidan en el suelo requieren suelo desnudo y deleznable, pero bien consolidado, para excavar sus nidos. Preparar trechos de terreno de magnitud suficiente para fines de control sería una tarea realmente formidable. Aun cuando se introdujeran en esos hábitats artificiales algunas de las especies más numerosas, pasarían años antes de que formaran una población estable. Y no podemos aventurar que fueran capaces de domeñar en tales condiciones las abejas africanizadas, muy agresivas.

Independientemente del papel económico de los lobos de abejas, es mucho lo que puede decirse de ellos como ejemplo de comportamiento adaptativo. Cada especie ha desarrollado características que le permiten medrar a pesar del número limitado de lugares de anidación y de la necesidad de compartir estos lugares con otros insectos, amén de superar el hostigamiento constante por parte de diversos parásitos.

A medida que vamos adentrándonos en las complejidades de la biología de los lobos de abejas, percibimos cuánto queda todavía por averiguar: comprobar, por ejemplo, que los machos segreguen feromonas específicas de cada especie o cuáles sean las relaciones que ligan a machos y hembras, y a las hembras con sus parásitos. No podemos olvidar, por otro lado, que, de las 34 especies norteamericanas, sólo se han estudiado, en alguna medida, una veintena. Los entomólogos somos conscientes de que los lobos de abejas seguirán planteando un reto intelectual durante muchos años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VOLATILES FROM MANDIBULAR GLANDS OF MALE BEEWOLVES (HYMENOPTERA: SPHECIDAE, *PHILANTHUS*) AND THEIR POSSIBLE ROLES. J. O. Schmidt, K. M. O'Neill, H. M. Fales, C. A. McDaniel y R. W. Howard en *Journal of Chemical Ecology*, vol. 11, n.º 7, págs. 895-901; julio de 1985.

VENOMS OF THE HYMENOPTERA: BIOCHEMICAL, PHARMACOLOGICAL AND BEHAVIOURAL ASPECTS, dirigido por Tom Piek. Academic Press, 1986.

THE NATURAL HISTORY AND BEHAVIOR OF NORTH AMERICAN BEEWOLVES. Howard E. Evans y M. O'Neill. Cornell University Press, 1988.

El hombre neolítico y la muerte

El hecho cultural de inhumar a los muertos evoluciona a lo largo del Neolítico. El estudio de las tumbas y su equipamiento permite atisbar las transformaciones sociales concomitantes

Alain Gallay

Las emociones suscitadas por la profanación de sepulturas indican hasta qué punto la inhumación es una poderosa característica cultural humana. Se trata de la costumbre de nuestros antepasados mejor conocida, pues deja en el suelo los vestigios más duraderos, más explícitos y, con frecuencia, también los más espectaculares.

La aparición, hace 10.000 años, de economías agrícolas en diversos puntos del planeta, sumada a la desaparición de los efectos ecológicos de los tiempos glaciales, estuvo cargada de consecuencias para la evolución humana, sobre todo por sus efectos sobre el crecimiento demográfico: la descendencia de agricultores y ganaderos siempre es más numerosa que la de los cazadores-recolectores. Junto con ello, a partir del Neolítico se multiplican las sepulturas y cementerios, rica fuente de información sobre las creencias y la ideología de nuestros antepasados coterráneos. Vamos a hacer aquí balance de los conocimientos que tenemos sobre los rituales funerarios del Neolítico europeo, sin olvidar que sus fuentes se hallan en el Oriente Próximo.

Las interpretaciones que de la diversidad de rituales funerarios dan los prehistoriadores se organizan en torno a dos ejes fundamentales. El primero llama la atención sobre las consecuencias ideológicas de la aparición de la agricultura: las comunidades se arraigan en sus terruños; las creencias religiosas cristalizan con el paso del tiempo y de las generaciones; el culto a los antepasados pasa a ser expresión pertinente de la permanencia social. Tal culto se concreta en la importancia concedida a los difuntos y a los arreglos funerarios, y da testimonio del papel que tiene en la estructuración y funcionamiento del mundo de los vivos. Las interpretaciones de este tipo, fundadas en el análisis de las sociedades agrarias actuales, poseen sólido fundamento etnológico, pero su capacidad explicativa no pasa de reducida cuando pretendemos comprender detalles de rituales funerarios complejos y diversificados.

En un segundo tipo de argumentación, los prehistoriadores se esfuerzan por medir el "valor" relativo de los ajuares fúnebres, teniendo en cuenta la escasez y rareza de la materia prima y la complejidad de su fabricación, sobre cuya base tratan de identificar luego las desigualdades cada vez más acentuadas que deberían caracterizar el devenir de las sociedades neolíticas, según una perspectiva neoevolucionista. Por desgracia, en diversas etapas del desarrollo de las sociedades neolíticas (por mencionar tan sólo a éstas) nos tropezamos con razonamientos semejantes que engendran interpretaciones idénticas. Dejamos entonces de saber qué significa desigualdad, al percatarnos de la extrema variedad de situaciones sociales a las que dicho concepto resulta aplicable.

Vamos a examinar en qué medida coinciden las transformaciones de los ritos funerarios con las grandes etapas del desarrollo económico y social que presumiblemente experimentaron las sociedades neolíticas y propondremos un modelo sencillo de tal desarrollo histórico. Después, tras haber investigado una clasificación general de los rituales funerarios conocidos, trataremos de ver hasta dónde la hipotética organización social de las comunidades agrícolas y la aparición de desigualdades son reflejo de la actitud que el hombre adopta frente a la muerte.

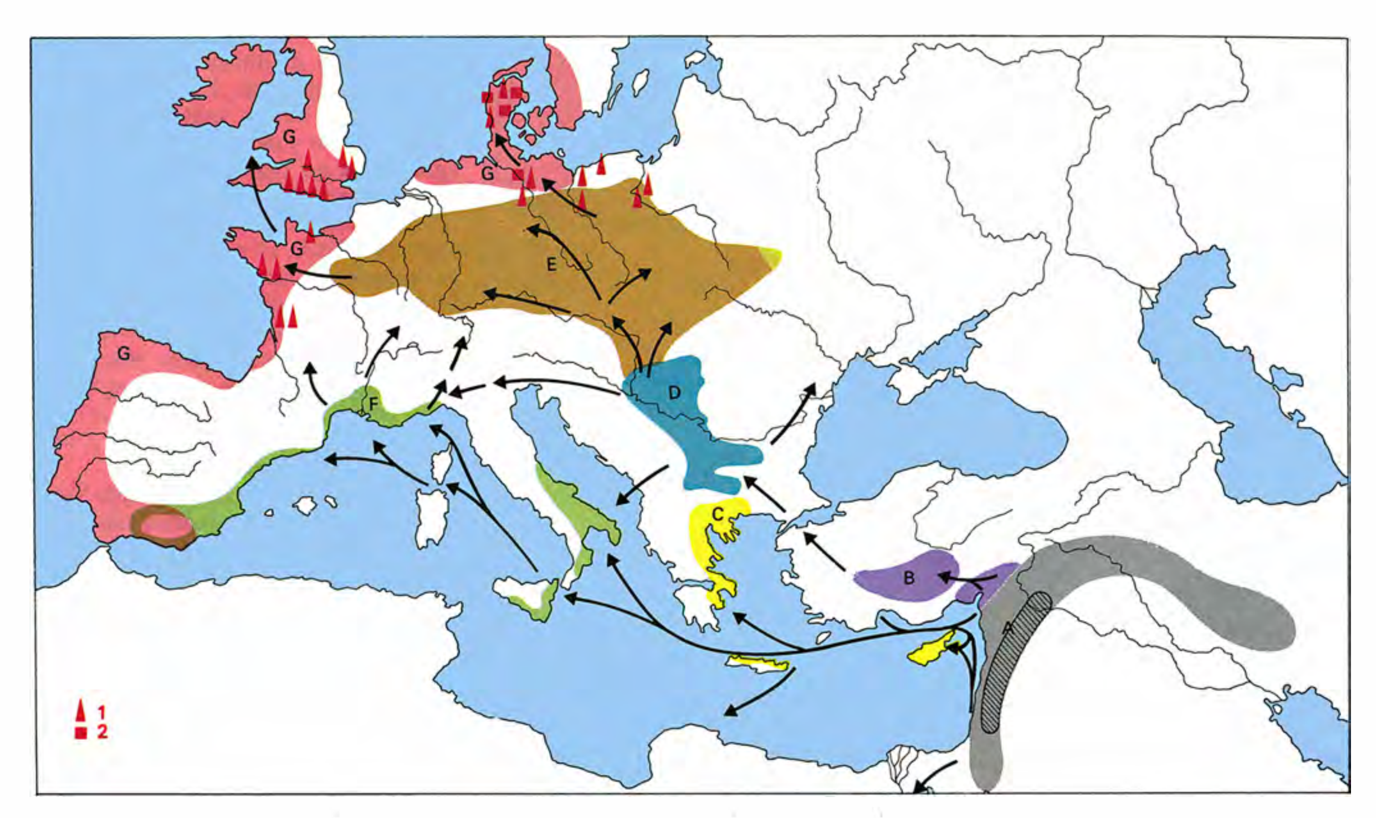
En todas las sociedades cuya estructura social está esencialmente fundada sobre el parentesco (trátese de cazadores-recolectores o de cultivadores), las unidades sociales tienden a mantener entre sí las máximas distancias posibles, para minimizar las situaciones de conflicto. La cohesión social permanece débil hasta el momento en que, llegada la densidad de población a cierto valor umbral, aparecen estructuras de poder más constrictivas.

Un modelo del desarrollo de las sociedades neolíticas

Las superiores tasas de poblamiento características de las sociedades agrarias presentan tres aspectos entrelazados (sin que aquí nos pronunciemos sobre el falso problema de la distinción entre causa y efecto), a saber: 1) las fuerzas de agregación de las unidades sociales tienden progresivamente a equilibrar las tendencias a la segmentación, para acabar predominando cuando la densidad de población aumenta; 2) aparecen técnicas intensivas de subsistencia: abonado, utilización del arado, policultivo, irrigación, etc.; 3) la sociedad se estructura y jerarquiza obedeciendo a diversas modalidades. Surge una cierta diferenciación social y aparecen formas de caudillaje.

Son éstos los aspectos que encontramos en la evolución de las sociedades del Neolítico europeo. A una fase de expansión de los grupos agrarios, originada en el Cercano Oriente y que se corresponde con un frente pionero y con una situación de frontera en movimiento, le sucede una fase de estabilización y relativa fijación de los agrupamientos humanos en territorios particulares. La aparición y difusión del arado en Europa durante el transcurso del cuarto milenio modifica profundamente las relaciones del agricultor con su entorno. En fin, diversos autores se han consagrado a desvelar, en ciertos casos concretos, las pruebas materiales de la existencia de sociedades estra-

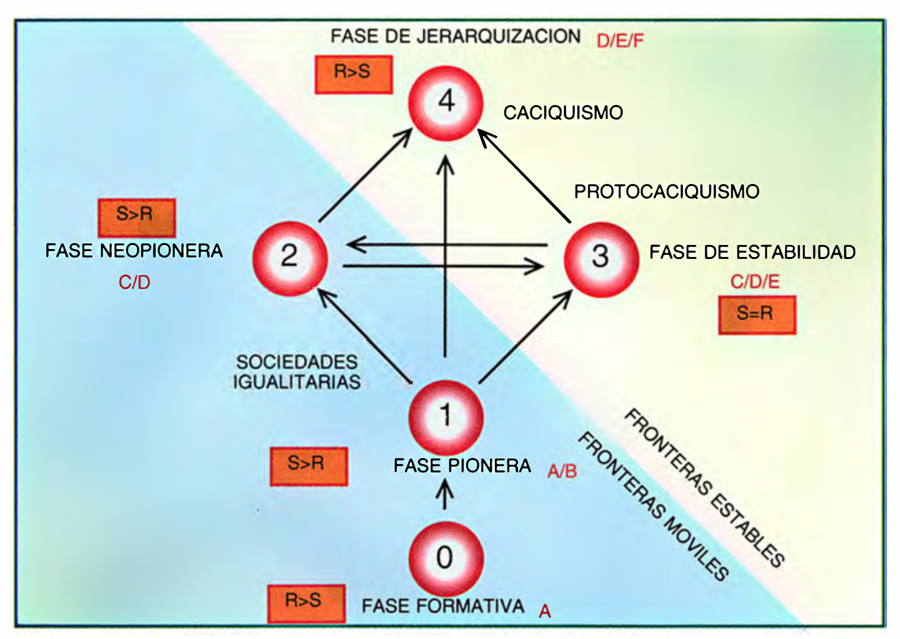
ALAIN GALLAY es profesor titular de la Universidad de Ginebra y director del departamento de antropología y ecología.



1. DIFUSION DEL NEOLITICO en Europa desde los centros de invención del Cercano Oriente. Las fechas dadas son años antes de nuestra era. Se fundan en dataciones por carbono 14, calibradas por estudio de los anillos de crecimiento de los árboles y, en el caso de las fechas más antiguas, corregidas según la escala establecida mediante dataciones uranio-torio. Este mapa sólo refleja la primera difusión del Neolítico en Europa (fases pionera y neopionera) y el ulterior desarrollo del megalitismo por la fachada atlántica europea. A: Zona de neolitización del Creciente Fértil. B: Primera extensión del neolitismo de Anatolia. C: Colonización de Grecia y de las islas del Egeo. D: Neolítico balcánico antiguo de la civilización de Starcevo. E: Cultura danubiana. F: Neolítico mediterráneo antiguo. Civilización de la cerámica impresa y de la cerámica cardial. G: Zona de extensión del megalitismo primario. Túmulos alargados triangulares (1) y rectangulares (2).

FECHAS (a.C.)	FASE FORMATIVA	FASE PIONERA	FASE NEOPIONERA	FASE DE ESTABILIZACION	FASE DE JERARQUIZACION
11000	Natufiano (Levante mediterráneo)				
10000	Natufiano (Levante mediterráneo)				
9000	Neolítico precerámico A (Levante mediterráneo)	Neolítico precerámico B (Levante mediterráneo)			
8000		Neolítico precerámico B (Levante mediterráneo)			
7000		Catal Hüyük (Anatolia)			
6000		Catal Hüyük (Anatolia) Primer Neolítico griego			
5000		Cerámica impresa (Med.) Cerámica cardial (Med.) Cerámica encintada (E. Cen.)			
4000			Epicardial (Sur Fran.) Chasseano antiguo (Sur Fran.) Cortaillod antiguo (Suiza)	Lengyel (E. Cen.) Cerny (Cuenca París)	Eneolítico balcánico Karanovo VI (Bulgaria)
3000				Cortaillod (Suiza) Chasseano (Francia) Peu Richard (Francia) Michelsberg (Alemania)	Bodrogkeresztur (Hungría) Baden (Balcanes)
2000				Sena-Oise-Marne Saône-Rhône	Anforas globulares Cerámica cordada Cerámica campaniforme

2. CLASIFICACION CRONOLOGICA de las civilizaciones, habida cuenta de las distinciones apreciadas en el plano de la dinámica social del poblamiento. La definición de los grupos culturales puede basarse en criterios geográficos (civilización Seine-Oise-Marne), en particularidades estilísticas de las cerámicas (civilización de la cerámica campaniforme), en los nombres de los asentamientos (Michelsberg, Chasseano, por el yacimiento del campo de Chassey), o bien, por último, en particularidades tecnológicas. (Eneolítico designa la civilización que conocía la metalurgia del cobre.)



3. MODELO de la evolución de las sociedades neolíticas fundado en la dinámica de los poblamientos. Cada estadio se encuentra definido por un equilibrio variable entre los procesos de segmentación (S) y de reunión (R) de las unidades domésticas que las componían. La fórmula S > R designa sociedades en expansión territorial (fases pionera y neopionera); la fórmula S = R connota fases de equilibrio, en las cuales la fragmentación siempre posible de las comunidades agrícolas está contrapesada por mecanismos de reunión (acogida en el seno de las aldeas de familias extranjeras). La fórmula R > S alude a procesos de densificación demográfica. A una fase de fronteras móviles, característica de los períodos más antiguos de la neolitización (sin incluir la fase formativa), le sigue una fase de fronteras más estables, en el curso de la cual los movimientos de las poblaciones son más limitados. Las letras A a F designan los rituales funerarios de los diversos estadios de desarrollo.

tificadas por medio de elementos indicadores de un desigual reparto de los bienes entre los individuos.

Los trabajos de Pierre Pétrequin, investigador del CNRS francés, sobre la evolución de las estaciones litorales nordalpinas han permitido identificar las relaciones entre la densidad de ocupación del suelo, el tamaño de los asentamientos, la intensificación de los cultivos y la aparición de estructuras sociales más rígidas.

Fundándonos en ellos, proponemos un esquema evolutivo de las sociedades neolíticas europeas planteado en cuatro fases.

En la primera, la fase pionera, las fuerzas de segmentación priman sobre las tendencias a la reunión de las unidades sociales. Nos encontramos con una situación de frontera móvil, en la cual sociedades en apariencia igualitarias van ocupando progresivamente tierras vírgenes bajo los efectos de la dinámica propia de las sociedades agrícolas. Esta fase se detecta en las tierras más fértiles del Mediterráneo y de Europa central; la agricultura no pasa de ser una agricultura itinerante, basada en la azada.

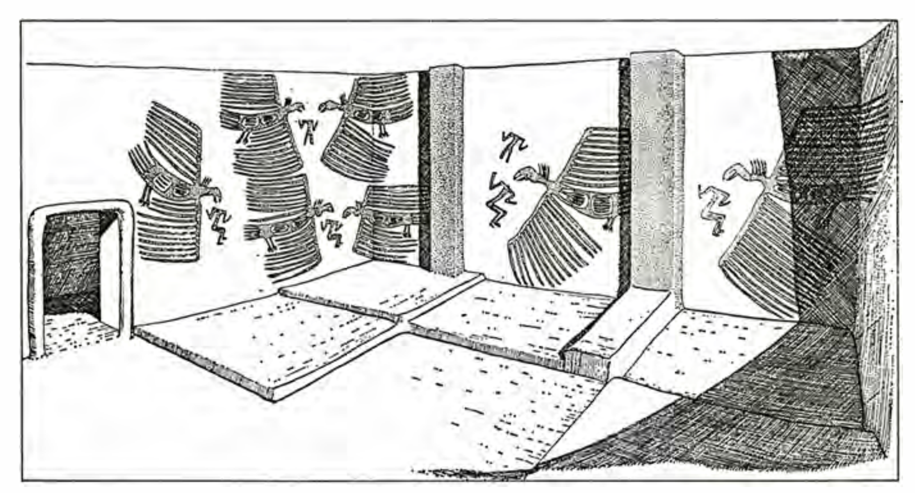
La segunda fase, la neopionera, no muestra, desde el punto de vista de la dinámica demográfica y social, diferencias fundamentales con la anterior. Históricamente más tardía, atañe a nichos ecológicos marginales, menos favorables para la agricultura, como las tierras morrénicas del norte de Europa o de los Alpes, o los terrenos de la costa atlántica.

En la tercera fase, denominada fase de estabilización, las fuerzas de reunión se equilibran con las tendencias a la segmentación, en un momento en que prácticamente todas las tierras de Europa están ocupadas por agricultores. Las sociedades se arraigan en sus terruños y aparece cierta competencia por el territorio; la situación descrita corresponde al fin de los desplazamientos de fronteras que caracterizan a los movimientos pioneros. Aparecen, en determinados grupos, innovaciones técnicas; así, el arado o la metalurgia del cobre. La intensificación de los cultivos está señalada por una reducción de los períodos de barbecho; ciertas aglomeraciones aldeanas incorporan estructuras defensivas, emplazándose en colinas, riberas de lagos o terrenos pantanosos, o se dotan de empalizadas. La estabilización de las poblaciones queda señalada por la diversificación de estilos cerámicos.

Finalmente, en la última fase, denominada de crecimiento y jerarquización, las tendencias reunionistas prevalecen. Las sociedades se estructuran en regímenes de caudillaje. La organización económica de la aldea sigue estando fundada en la autosuficiencia, aunque empiece a aparecer una cierta especialización técnica, sobre todo en metalurgia y quizá también en el tratamiento de la cerámica (cerámica campaniforme, cerámicas grafitadas balcánicas), a la vez que se intensifican los intercambios a gran distancia.

Este esquema del desarrollo del Neolítico en Europa no puede ser uniforme y la cronología de las diversas fases varía de una región a otra. Se han observado casos de regresión; así, pueden darse retornos desde la fase de estabilización a la neopionera debidos a la expansión hacia nuevos territorios marginales. La transición de una fase a otra, además, puede ser más o menos rápida.

Por último, añadiremos a este esquema una fase formativa, limitada al Oriente Próximo, y más específi-



4. PINTURAS MURALES de una casa del asentamiento neolítico de Çatal Hüyük, en Turquía, hacia el 7000 a.C. Los buitres parecen devorar a individuos sin cabeza. Estas representaciones arrojan luz sobre el ritual funerario: las sepulturas descubiertas bajo las plataformas de las habitaciones han proporcionado, en efecto, esqueletos de individuos desmembrados. Es posible, pues, que antes de ser inhumados, los muertos fuesen expuestos al aire libre y parcialmente devorados por estas aves.

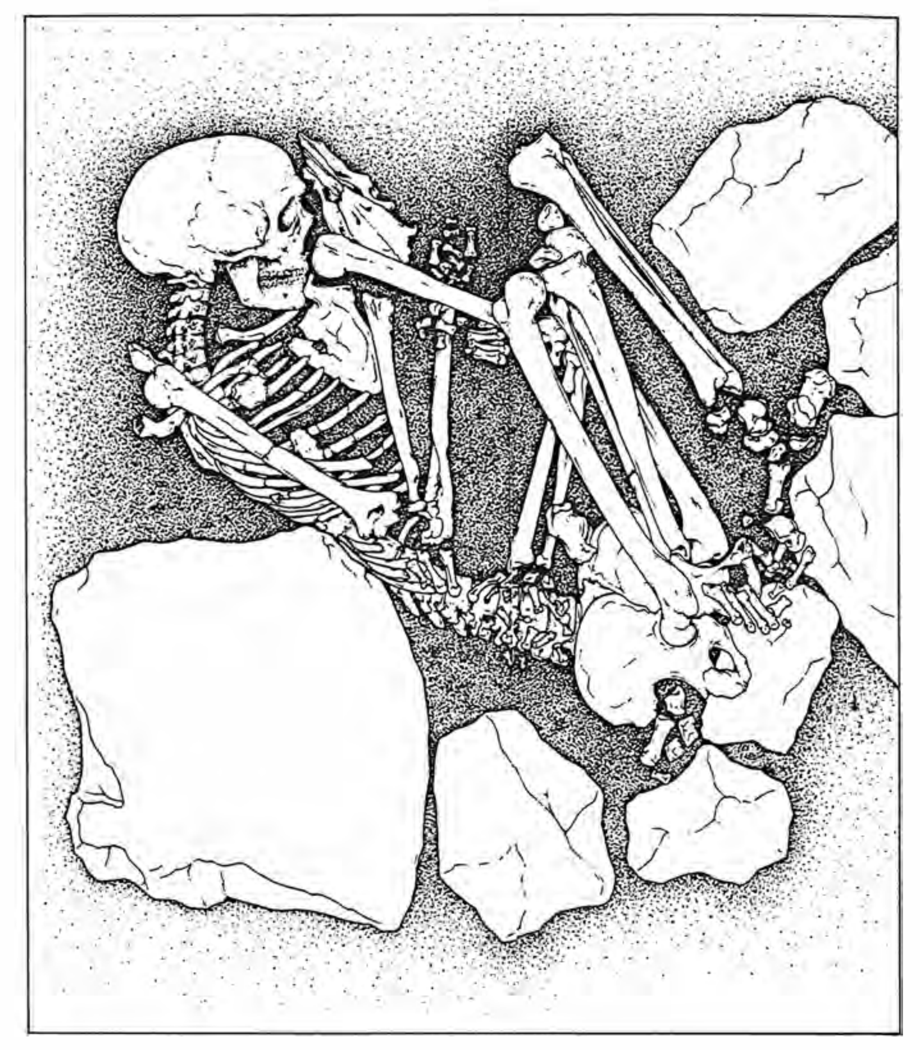
camente al Levante mediterráneo, para dar cuenta de los procesos históricos ligados a la aparición progresiva de las técnicas agrícolas. Ahora ya podemos proponer una clasificación de los principales ritos funerarios y respetar a la vez, al menos en parte, el orden cronológico.

Sepulturas en los lugares de residencia

Hay un primer conjunto de sepulturas que agrupan los ritos funerarios coetáneos a las primeras fases del Neolítico, momento en el cual se produce la elaboración de las tecnologías agrarias en la zona del Levante mediterráneo a partir del sustrato mesolítico natufiano. Incluiremos también las sepulturas coetáneas con el primer período neolítico de Anatolia, hacia 9300 a.C., que inicia la fase pionera de la que resultará la colonización agrícola de Europa.

Tres características distinguen a sus ritos funerarios. Las sepulturas están íntimamente asociadas a los hábitats y los difuntos son inhumados en el suelo de las viviendas o en su proximidad inmediata: los vivos y los muertos permanecen en contacto. Se observa, en segundo lugar, una gran variabilidad en la posición de los cuerpos. Las inhumaciones primarias coexisten con las secundarias, que comportan segmentos corporales previamente disociados y reagrupados luego sin orden ni concierto. En resumen, es uso corriente el descuartizamiento previo del cadáver, con desarticulación de los miembros y separación de la cabeza. Los cráneos son objeto de una particular atención, que puede parecer morbosa; a veces se reagrupan en fosas aparte, pero otras quedan expuestos al aire libre, en las habitaciones.

Algunos ejemplos ilustran la extrema diversidad de los ritos (ya perceptible en el natufiano), que van desde la inhumación simple, individual o colectiva, a la inhumación secundaria, colectiva por lo general, aunque en ocasiones encontremos ambos tipos de tratamiento yuxtapuestos en la misma tumba. La preparación de las sepulturas es rudimentaria; algunas veces están endurecidas con arcilla o se hallan recubiertas de losetas. La fase *IV B* de Mureybet, a orillas del Eufrates, se caracteriza a la vez por tumbas individuales en fosa, que contienen cuerpos intactos, y por cráneos expuestos en pedestales en las habitaciones. Encontramos cráneos magníficos en el Neolítico precerámico A de Jericó, sobremodelados con arcilla y disociados de las sepulturas, en las que no es raro que los esqueletos hayan sido despojados de sus cráneos. Se ha descrito un ritual complejo en el Neolítico precerámico *B* de Cayönü Tepesi, en Turquía, por el cual los cuerpos, previamente descuartizados sobre una gran losa de piedra (en la que se han identificado trazas de sangre humana y animal), se reunían luego en pequeñas estancias anejas. En la vecindad inmediata de la gran sala donde se encontraba la mesa de descuartizamiento, tres cuartitos albergaban más de 90 cráneos y cierto número de esqueletos humanos, enteros o incompletos.



5. SEPULTURA de un individuo masculino de mediana edad en la gruta Gazel, en el Mediodía francés. Data del fin del neolítico antiguo de cerámica cardial (primera mitad del milenio va.C.). La forzada posición del esqueleto hace pensar que se usaran medios de contención perecederos (ligaduras, saco...). Las tumbas relacionadas con la civilización de la cerámica cardial son muy raras. Obsérvense las piedras que rodean el cuerpo y la ofrenda de un cráneo de suido, que reposa sobre el hombro izquierdo. (Excavaciones realizadas por J. Guilaine.)

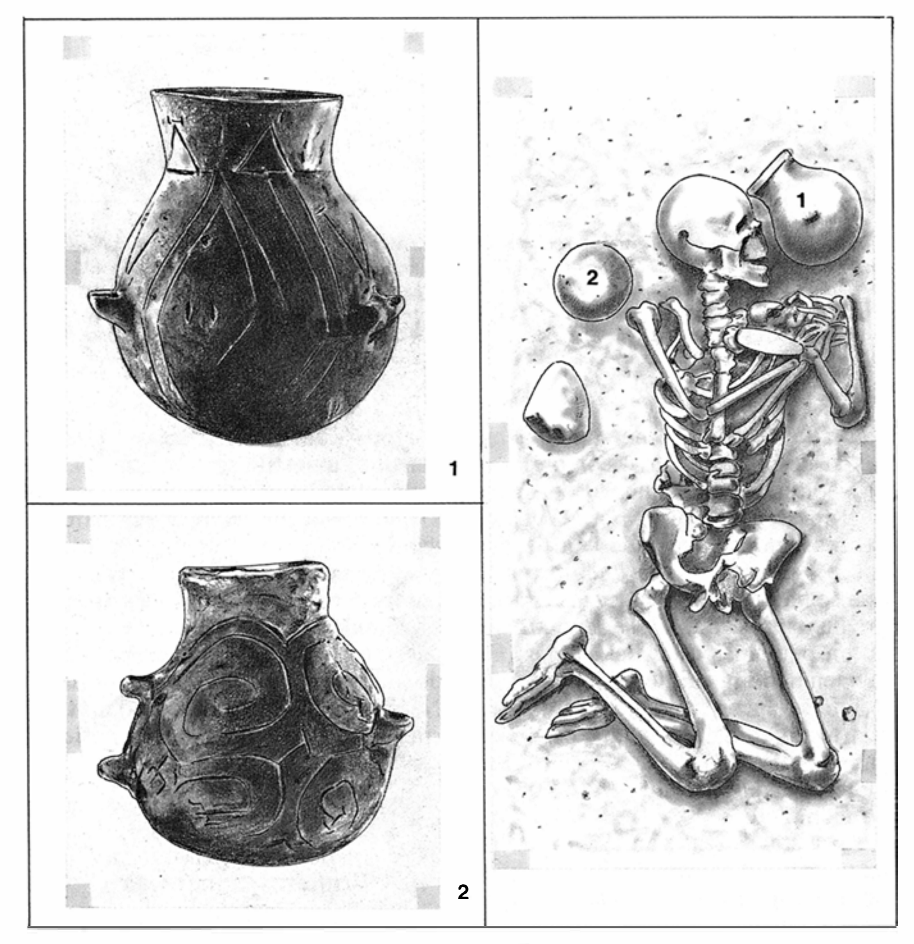
En Çatal Hüyük, en Anatolia, los cuerpos están inhumados bajo las plataformas interiores de las casas, cuyas habitaciones, decoradas con pinturas murales, son consideradas santuarios. Los cuerpos, que en ocasiones son varios agrupados, suelen aparecer incompletos. Las pinturas murales, en las que figuran buitres asociados a cuerpos humanos sin cabeza, hacen ver que, antes de ser inhumados, los cadáveres humanos debían quedar expuestos al aire libre y ser parcialmente devorados por estos carroñeros. La costumbre de enterrar a los muertos en las habitaciones o en la proximidad inmediata de las viviendas, o incluso en construcciones abandonadas, vuelve a darse en el primer Neolítico griego, en el cual lo más corriente es la inhumación en posición replegada.

Inhumaciones en posición replegada. Primeros cementerios

Esta segunda fase corresponde a la primera difusión del Neolítico en Europa y al frente pionero perceptible a partir de 6500 a.C. en el eje danubiano (civilizaciones de Starcevo y de la cerámica encintada) y a partir



6. LOS NIVELES DEL NEOLITICO ANTIGUO de la gruta de Gardon, en Ambérieu-en-Bugey, Ain, datan del Epicardial, hacia 5000 a.C. (excavaciones de J. L. Voruz, Universidad de Ginebra). Han proporcionado, mezclados con restos de fauna doméstica, varios fragmentos de huesos humanos que muestran signos de seccionamiento. Una mandíbula porta incisiones sobre los bordes anterior y posterior de la rama ascendente, asociadas al seccionamiento del músculo masetero, y otra sobre la base del cóndilo. Un cráneo muestra otras marcas. Estos testimonios son contemporáneos de los descubrimientos de Fontbrégoua, donde la existencia de canibalismo parece probada.



7. INHUMACION de la fase antigua de la civilización de la cerámica encintada, descubierta en Sonderhausen, Alemania, que data de la segunda mitad del sexto milenio a.C. El ajuar fúnebre comprende dos potes con decoración incisa, una muela de gres junto a un canto rodado de cuarzo y una azuela de piedra pulida, que descansa sobre el pecho. Estas azuelas se utilizaban para el trabajo de la madera y como armas.

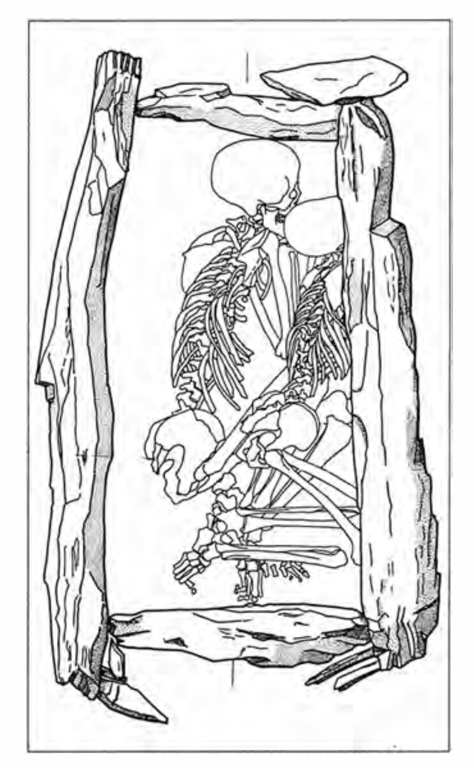
de 6000 a.C. en las costas mediterráneas occidentales (cerámica "impresa" y cerámica cardial).

Predominan en las fosas las inhumaciones en posición replegada o muy acurrucada (posición "fetal"). La civilización de Starcevo, en el eje danubiano, sigue presentando sepulturas aisladas, directamente ligadas a los hábitats. Los primeros cementerios separados de las aldeas aparecen en la civilización de la cerámica encintada, a partir de 5500 a.C. Los ajuares funerarios (piezas de cerámica, hachuelas, adornos de conchas...) no parecen testimoniar un desigual reparto de los bienes y la sociedad sigue siendo igualitaria.

La riqueza de la tumba infantil de Ensisheim, en Alsacia, dotada de objetos abundantes, entre los que se cuentan varios collares compuestos de perlas, conchas, valvas de espóndilo y de megacardito, así como un ídolo trabajado a partir de un metacarpo de caprínido, resulta difícil de interpretar desde esta perspectiva igualitaria. Las conchas de espóndilo contenidas en esta tumba y originarias del mar Negro se encuentran en numerosas tumbas de la civilización de la cerámica encintada; la difusión de estos ornamentos a lo largo del eje danubiano puede ser resultado de una especie de cadena de trueques de bienes prestigiosos entre las comunidades danubianas. Se han descrito mecanismos económicos y sociales de este tipo en Melanesia. La Kula estudiada por el etnólogo Malinowski en el archipiélago Tobriand es una institución que engloba trueques sistemáticos de conchas, desprovistos de cualquier carácter comercial.

Un descubrimiento extraordinario, efectuado en Thalheim, en Alemania, arroja cruda luz sobre las relaciones guerreras entre las comunidades de los tiempos de la cerámica encintada. En una gran fosa de detritus se encontraron dispersos en completo desorden un total de 34 individuos, entre ellos 9 hombres, 7 mujeres y 16 niños (más dos individuos de sexo no determinable), que probablemente pertenecían a una gran familia exterminada a golpes de azuela en la cabeza, como testimonian las señales de hundimiento observables en por lo menos 18 cráneos. Parece como si la familia hubiera sido asaltada mientras huía y hubiera sido despojada de los ornamentos, collares, etc., que sus miembros no podían dejar de llevar. Nos encontramos bien lejos de la imagen tradicional de una población pacífica, dispersa por un vasto territorio...

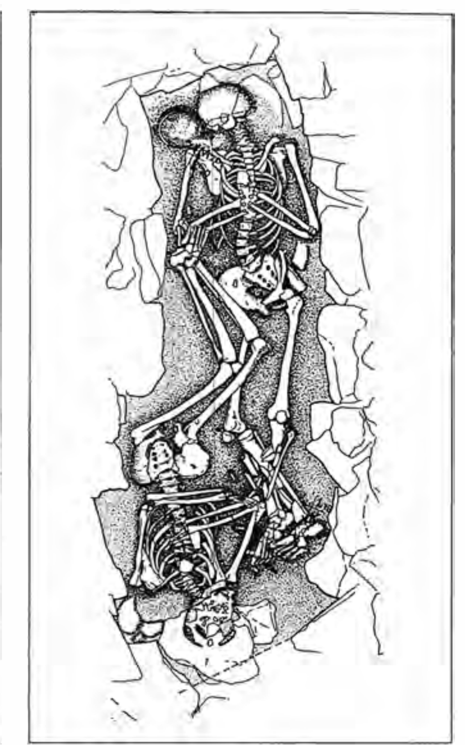
La inhumación individual en posi-



8. TUMBA CISTIFORME DOBLE del cementerio de Vidy-Sagrave, en las orillas del Léman, Suiza, perteneciente, probablemente, al Chasseano antiguo (excavaciones de P. Moinat), quinto milenio a.C. El análisis detallado de los dos esqueletos ha permitido demostrar la simultaneidad de las inhumaciones. Mientras que el primer individuo ocupa la posición central, el segundo está notoriamente descentrado y parece apenas "tolerado" en el espacio funerario. Pudiera tratarse de una persona sacrificada con ocasión de la muerte del personaje principal.



9. TUMBA EN CESTA del cementerio de Corseaux-sur-Vevey, en las riberas del Léman, perteneciente a la civilización de Cortaillod y datada entre 3650 y 3350 a.C. La tumba contenía seis adultos, tres hombres y tres mujeres. Las diversas inhumaciones no son contemporáneas y es probable que se haya abierto la tumba repetidamente para recibir nuevos cuerpos. Este tipo de sepultura anuncia ya las tumbas colectivas que se generalizan en la cuenca del Ródano al finalizar el cuarto milenio bajo la influencia del megalitismo atlántico.



10. UNA DE LAS TRES TUMBAS DOBLES del túmulo de Auzay, Les Châtelliers, en Vendée, perteneciente a la civilización de Peu-Richard, hacia 3000 a.C. Los dos hombres, que contaban de 20 a 40 años, estaban dispuestos con sus cabezas en las extremidades de la tumba y los miembros inferiores de uno descansando sobre los del otro. Junto a la cabeza de uno había una pieza de alfarería, y varias de sílex a sus pies. Sufrieron muerte violenta: uno presenta un hundimiento del parietal izquierdo y el otro una herida de flecha en vértebra lumbar.

ción replegada predomina también en el Neolítico mediterráneo antiguo. Los escasos hallazgos denotan sobre todo sepulcros aislados preparados en las grutas, que constituían las viviendas características de este período. Lo mismo que en Europa central, ciertos descubrimientos excepcionales dan fe de la violencia que afecta a determinadas relaciones sociales de aquel entonces. Así, en el mediodía de Francia, la gruta de Fontbrégoua ha proporcionado varias fosas pequeñas que exhiben acumulaciones de huesos. Diez depresiones vaciadas en el suelo estaban ocupadas por osamentas de animales salvajes y domésticos; otras tres contenían huesos humanos. Los huesos, tanto animales como humanos, muestran idénticas señales de cortes de carnicero, indicativas de un desjarretado sistemático de los cuerpos. Las incisiones que exhiben los huesos de las extremidades guardan relación clara con el seccionamiento de los tendones con cuchillos de sílex, mientras que las señales dejadas sobre el cráneo muestran que las pobres víctimas fueron cuidadosamente escalpadas. No cabe duda, pues, de la práctica del canibalismo en los tiempos de la civilización de la cerámica cardial. Se da una situación idéntica en los niveles coetáneos de la gruta de Gardon, en el Bugey, donde aparecen huesos humanos con signos de seccionamiento, mezclados con restos de fauna portadores de los mismos estigmas.

La colectivización de las tumbas

En los milenios v y vi, los sepulcros, individuales hasta entonces, se tornan colectivos, sobre todo en Francia y en Suiza. Esta importante evolución afecta a las civilizaciones surgidas del primer Neolítico mediterráneo y aparece tras una fase de colonización neopionera que arranca del epicardial y se prolonga en el Chasseano más antiguo, intensificándose luego, al tiempo que se estabilizan los poblamientos durante las fases calificadas de "Neolítico medio II" (Chasseano, Cortaillod, etc.) y de Neolítico reciente (civilización Seine-Oise-Marne; civilización Saône-Rhône).

En el transcurso de este prolongado período, las tumbas acogen en una misma estructura funeraria a un número cada vez mayor de individuos, al tiempo que persiste la inhumación en posición flexionada o contraída, propia del Neolítico antiguo. En algunos casos, la tumba contiene pocos individuos, casi siempre dos o tres, cuya disposición habla en favor de una inhumación casi simultánea o, en todo caso, separada por un reducido intervalo de tiempo. Se distingue, por lo general, un individuo "central" y uno o varios "periféricos", es decir, una cierta jerarquización de las inhumaciones. Tal disposición evoca la posibilidad de sacrificios humanos que tal vez acompañasen al deceso de individuos de especial relieve social.

Desde la segunda mitad del quinto milenio aparecen en el Chasseano antiguo sepulturas múltiples junto a sepulturas individuales, sobre todo en Pontcharaud, en Auvernia. Hay magníficos ejemplos en el yacimiento de Saint-Paul-Trois-Châteaux, en la región de Drôme, donde se han descubierto varias fosas circulares que



11. EL DOLMEN DE DOBLE CORREDOR de Dissignac se construyó sobre un nivel arqueológico premegalítico más antiguo, cuya cerámica, datada hacia 5000 a.C., guarda relación con los grupos epiencintados de la cuenca parisiense. El eje de los corredores del dolmen está perfectamente orientado en la dirección de salida del sol en el solsticio de invierno. El ciclo solar debía, pues, desempeñar un papel importante en la ideología funeraria de la época.

albergan de tres a ocho sujetos, aderezadas por el interior con un revestimiento de material perecedero. Este tipo de sepultura, limitado a los grandes emplazamientos de llanura, revela un ritual de excepción, relacionado con el carácter ceremonial de estos yacimientos arqueológicos.

Se encuentran emplazamientos comparables, cercados por zanjas discontinuas, en el Neolítico medio de la cuenca parisiense. Las zanjas de estos "campos" esconden en ocasiones osamentas humanas, como en Noyen; vestigios que probablemente acrediten el carácter litúrgico, al menos parcial, de tales disposiciones. Las inhumaciones en cajones de losetas de piedra de la región del lago Léman presentan a veces sepulturas múltiples, en apariencia simultáneas; estamos pensando sobre todo en la necrópolis de Lausanne-Vidy, recientemente excavada. Existen asimismo inhumaciones dobles en la fachada atlántica francesa, siendo de destacar Auzay, Les Châtelliers, en el contexto de la civilización de Peu-Richard.

Al mismo tiempo, y con frecuencia en los mismos cementerios, se desarrolla la costumbre de inhumar sucesivamente a varios individuos en un mismo y reducido espacio funerario. Tal regla es frecuente en los cementerios con cajones de losetas pétreas del Léman (Corseux, Pully Chamblandes) y del Valais. Volvemos a encontrarla en la civilización Seine-Oise-Marne de la cuenca parisiense, en la que se han excavado con mucho detalle varias estructuras de este tipo; estamos pensando en la sepultura triple de Pincevent y en las dos sepulturas colectivas de Marolles-sur-Seine, que contienen, respectivamente, 8 y 54 individuos.

Estas inhumaciones en grupo coexisten, a partir de la primera mitad del tercer milenio, con auténticas sepulturas colectivas, realizadas en las grutas naturales, excavadas por la mano del hombre o en auténticos monumentos megalíticos, rituales debidos a la influencia tardía y periférica del megalitismo atlántico que pasamos a examinar.

El megalitismo

El desarrollo del megalitismo (construcciones con grandes piedras) a lo largo de la fachada atlántica de Europa constituye, sin duda, una de las componentes más espectaculares de los ritos funerarios neolíticos. Su carácter más específico reside en la monumentalidad de las tumbas. Estos edificios han exigido un trabajo colectivo considerable, lo que implica la existencia de mecanismos sociales de coordinación y aplicación de energías humanas, aun cuando no estén obligatoriamente ligados a la existencia de un fuerte poder político de los jefes locales.

En contrapartida, el carácter colectivo de las tumbas pasa a ser un detalle menos relevante, pues se sabe que ciertos monumentos de grandes dimensiones, grandes túmulos alargados, sobre todo, no consentían sino un número muy limitado de inhumaciones.

El área de difusión de los megalitos es básicamente, al menos en su fase primaria, la periferia de las zonas de influencia de las civilizaciones del Neolítico antiguo danubiano y engloba toda la faz atlántica de Europa y el norte del continente, incluida Escandinavia meridional. En su evolución se distinguen dos fases: una antigua, situada entre 4500 y 3500 a.C., y una reciente, entre 3500 y 2000 a.C., en el transcurso de la cual el megalitismo penetra en regiones nuevas, sobre todo en la zona donde ya se manifestaba una cierta colectivización de las tumbas.

El origen de este fenómeno sigue siendo incierto. En la actualidad se rechaza todo modelo difusionista que aluda a una influencia cultural emanada de las primeras civilizaciones urbanas del Cercano Oriente; en cambio, las hipótesis que insisten en el papel preponderante de las sociedades mesolíticas autóctonas gozan hoy de cierto éxito. Así, A. Sherrat, de la Universidad de Oxford, admite, por ejemplo, que el megalitismo de la costa atlántica de Francia, y sobre todo el de Bretaña, posee un doble origen. Los túmulos muy grandes que contienen un número limitado de individuos inhumados en cámaras cerradas podrían guardar relación con auténticos colonos neolíticos venidos de sociedades agrícolas de origen centro-europeo. Desde esta perspectiva, los grandes conjuntos funerarios descubiertos en Passy, Richebourg, en el Yonne, que tienen conexión con los grupos recientes de la corriente danubiana (con la cultura de Cerny, sobre todo), podrían constituir un notable antecedente histórico de los grandes monumentos atlánticos. Las sepulturas de Passy constan de grandes estructuras alargadas delimitadas por zanjas (con o sin empalizada) que probablemente cercaban macizos tumulares hoy nivelados por la erosión. Estos cerros albergaban un número limitado de inhumaciones en posición tendida y pudieron haber sido concebidos en principio como sepultura única para alojar a un individuo que gozara de una posición de privilegio.

En contrapartida, opina que los dólmenes de corredor, dotados de abertura de la cámara sepulcral y con inhumaciones colectivas, que probablemente sean contemporáneos de los anteriores, podrían ser obra de poblaciones mesolíticas locales "neolitizadas" por contacto con inmigrantes. La historia posterior del megalitismo, sobre todo en la región de Carnac, daría tes-

timonio de las relaciones, en ocasiones conflictivas, que afectaban a las dos comunidades.

Según este autor, podemos detectar una dinámica comparable en todo el norte de Europa, con grandes túmulos cerrados, con pocas inhumaciones y dólmenes de corredor al inicio de la secuencia megalítica, y en Inglaterra, donde también hay grandes cerros alargados. A pesar de la gran coherencia de este esquema, el desarrollo precoz del megalitismo en la península Ibérica resulta difícil de integrar en él.

A partir de 3500 a.C., el megalitismo se expande a regiones nuevas: cuenca de París, mediodía francés, Alemania central, etc. Algunos túmulos son reconvertidos en cámaras megalíticas abiertas y las arquitecturas se diversifican.

Se detecta en esta época cierta jerarquización de las tumbas, claramente apreciable en Bretaña y en las islas Británicas. Monumentos muy grandes, de los que cabe dudar que en todos los casos sean tumbas, coexisten entonces con otras construcciones menores. Gavrinis y la Mesa de los Mercaderes en Bretaña, New Grange y Knowth en Irlanda, Kanterness y Maes Hove en las islas Órcadas, son otros tantos ejemplos en los que un gran monumento colectivo constituye el polo de un espacio ideológico y quién sabe si político que desborda el marco de la autonomía aldeana, tan característica de las primeras comunidades neolíticas. Cabe poner en relación un tercer conjunto con el desarrollo del Eneolítico balcánico y con la influencia de las brillantes civilizaciones de esta región, que se hace perceptible en Europa central a partir de la expansión de la civilización de Lengyel, hacia 4500 a.C.

La desigualdad naciente

En este complejo cultural tan diversificado se desarrolla por vez primera la metalurgia del cobre, que requería la aplicación de técnicas complejas, como la extracción de calcopiritas (mineral de cobre y hierro), la fundición del metal y su vertido en moldes. La costumbre de inhumar en cementerios separados de los hábitats se generaliza. Aunque sigue predominando la inhumación en posición acurrucada, en algunas regiones aparecen sepulturas en fosa con esqueleto tendido longitudinalmente. Si bien ciertas civilizaciones muestran preferencia por uno de estos dos ritos, en otros grupos culturales coexisten ambas costumbres, a veces en los mismos cementerios. Señalemos también la presencia en los Balcanes de monumentos dedicados a la memoria de un difunto (cenotafios), así como algunos depósitos de cráneos. Aparece la incineración en las civilizaciones de Lengyel y de Baden. Por ejemplo, el cementerio de Fonyód, en Hungría (Baden), no contiene sino incineraciones en urna, agrupadas en torno a una fosa redondeada que probablemente sirvió de lugar de cremación; ritual, empero, poco común.

En Europa central aparecen las primeras sepulturas múltiples o colectivas en fosa, sobre todo en las civilizaciones de Michelsberg y en los grupos surgidos tardíamente del horizonte lengyeliano. Nosotros hemos mencionado este mismo ritual más al oeste y por la misma época, en las culturas mediterráneas surgidas del Chasseano.

El fenómeno más característico de este conjunto lo constituye, sin duda, el desigual reparto de los ajuares fúnebres entre las distintas tumbas de un mismo cementerio, como se puede observar de forma muy clara en el Eneolítico balcánico y en Europa central. Interpretar esta situación, sobre todo la presencia de tumbas de extrema riqueza, plantea cuestiones de interés; no cabe duda de que refleja el reparto desigual de la riqueza entre los miembros de una sociedad, pero resulta muy difícil deducir de ello el tipo de estructura social. Aparte de la comprobación elemental de la existencia de relaciones no igualitarias, una aproximación más minuciosa a la dinámica social tropieza con la multiplicidad de circunstancias que han podido ocasionar las situaciones arqueológicas.

Presenta especial dificultad la selección de los rasgos relevantes que permitan elegir entre los dos tipos de sociedades inigualitarias retenidos por las escuelas neoevolucionistas, que tan caras les resultan a los autores anglófonos, a saber, las sociedades meritocráticas, en las que el estatuto social del individuo no es hereditario, sino adquirido por él en el curso de su vida por medio de diversas estrategias sociales; o las sociedades caciquiles estratificadas, en las que las desigualdades se transmiten hereditariamente.

El caso más espectacular de yuxtaposición de sepulturas diferentes se halla, desde luego, en la necrópolis de Varna, en Bulgaria; data de la segunda mitad del quinto milenio y guarda relación con la civilización de Karanovo VI. Este cementerio cuenta con más de un centenar de tumbas; de ellas, tres cenotafios y una tumba de un varón en inhumación tendida contienen una impresionante acumulación de ornamentos de oro (en ocasiones, más de 1000 objetos por tumba, equivalentes a 1,5 kilogramos de metal) y cetros en forma de hachas de combate, que probablemente simbolizan el poder guerrero. Las restantes tumbas contienen un gran número de inhumaciones tendidas o replegadas;



12. LA CAMARA FUNERARIA del dolmen MXII de la necrópolis de Petit-Chasseur, en Sion, Suiza, albergaba una sepultura colectiva con no menos de un centenar de individuos. Tras una primera fase de amortajamientos, se reformó por completo el interior de la tumba y los huesos preexistentes fueron apartados para permitir el depósito de más cuerpos, cuyos esqueletos han permanecido conexos, a pesar de la ulterior inhumación de muchos otros individuos más, cuyos restos se encuentran dispersos y aplastados. Las dataciones con carbono 14 permiten situar las primeras inhumaciones en esta tumba hacia el 3000 antes de nuestra era.

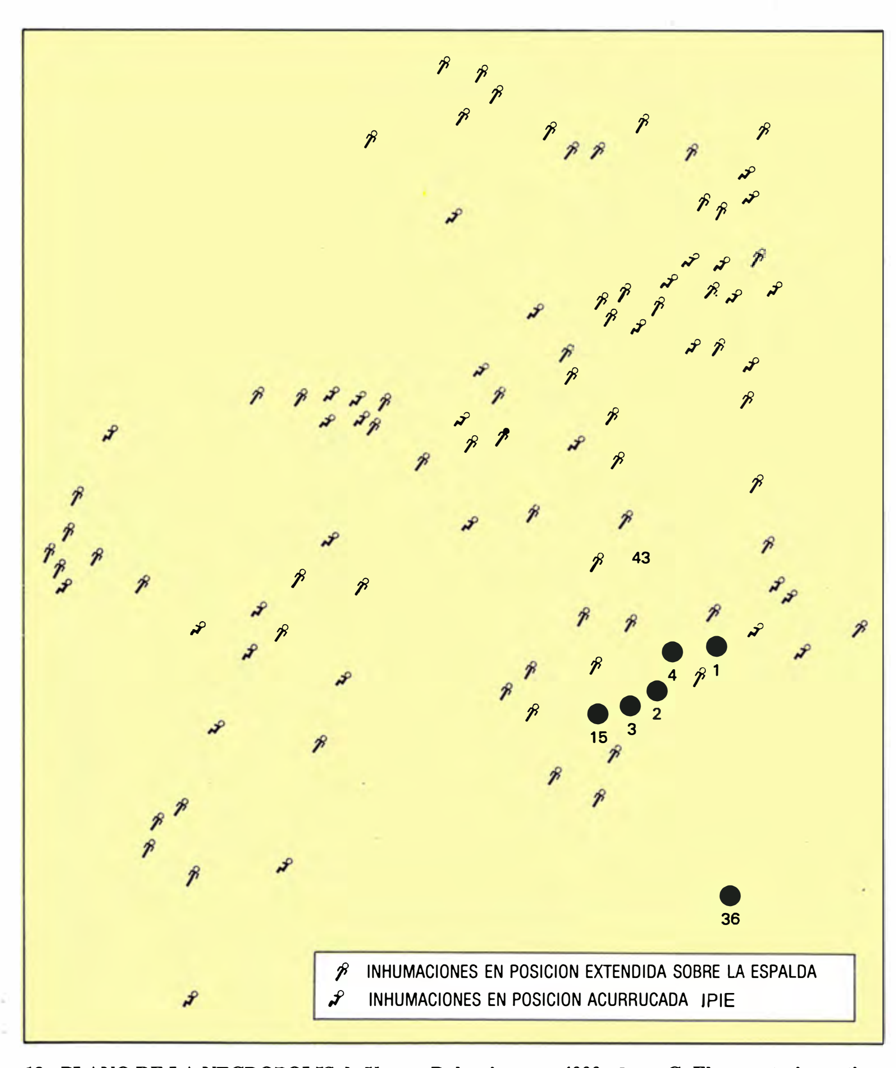
sus ajuares fúnebres son mucho más pobres. Otros cementerios del Eneolítico balcánico presentan diferencias del mismo tipo, aunque en formas menos espectaculares; mencionemos el cementerio de Tiszaval-Kenderföld, en Hungría (civilización de Bodrogkeresztur), donde el único individuo dotado de dos hachas de combate, una de cobre y otra de piedra, se encontraba enterrado en una fosa anormalmente grande, en el centro del cementerio.

Retorno a las tumbas individuales

El fin del Neolítico se caracteriza en Europa por un reajuste fundamental de las interacciones culturales. Los contactos, cada vez más estrechos, entre las comunidades europeas favorecen la difusión de modas y una cierta uniformización de la civilización material. Los movimientos locales de poblaciones, que atraviesan o desprecian los grandes ejes del poblamiento neolítico primitivo, consiguen conferir cierta originalidad a la segunda mitad del tercer milenio anterior a nuestra era. Si prescindimos de la civilización de las ánforas globulares, cuyos ritos funerarios se aproximan a los de la zona de las estepas (tumbas que alojan a varios individuos, sepulturas de animales), dos son los complejos culturales, quizá sucesivos, que marcan más señaladamente esta época: la civilización de la alfarería cordada, limitada a la porción septentrional del continente, y la civilización de cerámica campaniforme, que engloba a la Europa central y occidental.

El hecho más relevante del período es, sin discusión, la reaparición de la sepultura individual con inhumación acurrucada o fuertemente replegada; la novedad, sin embargo, es que la tumba puede estar señalada en superficie por la construcción de un pequeño túmulo. Tal vez esta nueva forma de señalar a los difuntos guarde relación con la mayor importancia que, a partir de entonces, se concede a los estatutos sociales de los individuos en la comunidad agrícola primitiva y señale así una ruptura conceptual con respecto a las tumbas colectivas o a los cementerios que no comportan una señalización importante de cada tumba. En este contexto, han sido varios los arqueólogos que han tratado de apreciar si los ajuares fúnebres descubiertos en las tumbas dan testimonio de un desigual reparto de riquezas en la sociedad. Tales diferencias quedan menos señaladas en la civilización de la cerámica cordada, cuyos ajuares son muy uniformes, con escasas excepciones; son en cambio más claras en la campaniforme, pero no encontramos nunca conjuntos funerarios excepcionales, como en el caso del Eneolítico balcánico, o como ocurrirá más tarde, al comienzo de la Edad del Bronce.

La sociedad comienza, pues, a estratificarse. Empiezan a aparecer las desigualdades, pero no debían de ser de carácter hereditario y reflejan tan sólo diferencias de estatuto adquiridas en el curso de la existencia. No parece que existan todavía sistemas de jefatura hereditarios.



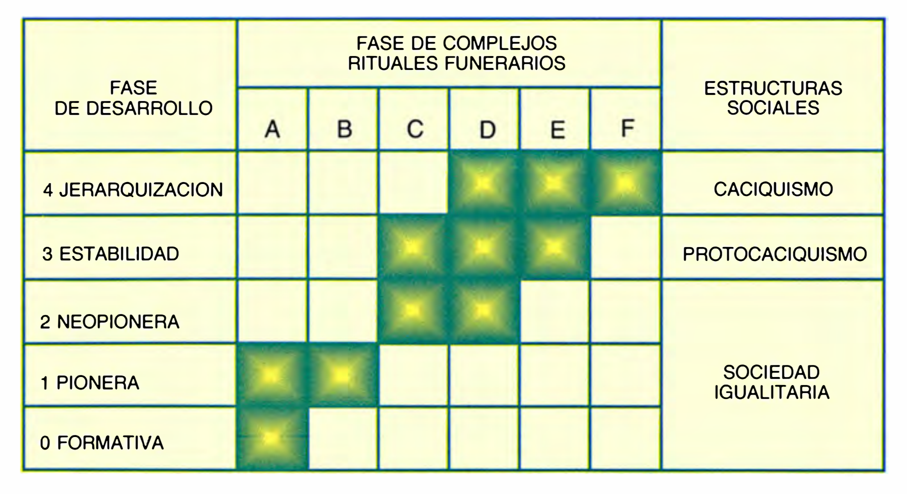
13. PLANO DE LA NECROPOLIS de Varna, Bulgaria, unos 4000 años a.C. El cementerio contiene inhumaciones extendidas y replegadas, así como cenotafios. Un lote de siete tumbas ubicadas hacia el sudeste de la necrópolis ofrece un interés excepcional. La tumba 43, ocupada por un hombre de 40 a 50 años en posición extendida, contenía más de un millar de objetos de oro. Las tumbas 2, 3 y 15 son cenotafios, con la cabeza del difunto simbolizada por una máscara de arcilla. La variedad de los ritos funerarios y las grandes diferencias de riqueza apreciables en los equipamientos fúnebres testimonian una sociedad muy diferenciada ya en el plano social.

Ritos funerarios y evolución de las sociedades

Concluida esta panorámica, hay que preguntarse por la existencia de posibles concordancias entre los cambios apreciados en los ritos funerarios y el esquema de la evolución de las sociedades neolíticas que habíamos propuesto. La conexión no es inmediata. No existen, a la escala continental en que nos hemos situado, relaciones sencillas entre la forma en que nosotros concebimos la historia, el desarrollo económico y social de las sociedades neolíticas y las transformaciones arqueológicamente registradas por los ritos funerarios.

A pesar de las tentativas efectuadas por las escuelas marxistas, resulta difícil descubrir mecanismos sencillos que relacionen economía, sociedad e ideología funeraria.

Hoy en día resulta posible comprender las líneas maestras de la neolitización de Europa; empero, numerosos fenómenos históricos resultan totalmente contingentes. Volvemos a encontrar aquí la posición de historiadores como Paul Veyne, para quien la historia no puede ser sino descriptiva. Los esquemas neoevolucionistas, de-



14. CONCORDANCIAS entre las fases del desarrollo de las sociedades neolíticas europeas y los ritos funerarios: A, sepulturas en el lugar de residencia; B, inhumaciones individuales en posición replegada; C, colectivización de las tumbas; D, megalitismo; E, diversificación de ajuares fúnebres; F, reaparición de las tumbas individuales. Cada fase puede presentar, pues, gran variedad de rituales, según las civilizaciones de que estemos hablando.

masiado burdos, no alcanzan a explicar una realidad cuya complejidad es muy grande.

En definitiva, un ancho foso separa las interpretaciones propuestas por los arqueólogos para dar cuenta del funcionamiento y evolución de las sociedades del pasado, por un lado, y los vestigios materiales, las sepulturas en este caso, que sirven de fundamento a los análisis, por otro. Aunque dichas interpretaciones se inspiren en el repertorio de conceptos de la antropología y la etnología contemporáneas, rara vez se suscita la cuestión de saber si los vestigios descubiertos, objeto en la actualidad de una descripción cada vez más precisa, pueden justificar, en el plano material, tales nociones. ¿Con qué criterios materiales, observables en la labor arqueológica, resulta posible identificar, sea por caso, un "bien de prestigio", cuando se sabe que este término solamente connota un valor simbólico y social particular, atribuido a un objeto? La etnología nos enseña, en efecto, que la materia prima, la forma o la decoración no los singularizan forzosamente con respecto a los de carácter utilitario.

Actualmente parece más importante llegar a comprender las limitaciones y dificultades con que tropieza la aproximación arqueológica al pasado que proponer grandes síntesis históricas del desarrollo de las sociedades. Hemos creído que el ejemplo de los rituales funerarios neolíticos es una buena ilustración.

El cuadro de concordancia que hemos presentado es un lienzo que sirve de orientación para una reflexión más atenta sobre las complejas relaciones que ligan a una sociedad con su ideología y a la ideología con los rituales que constituyen su expresión, todo ello sin perder de vista el limitado carácter de los residuos materiales. A pesar de ciertas constantes —estamos pensando sobre todo en la frecuencia con que se dan las inhumaciones en posiciones replegadas o contraídas en todos los ejemplos descritos— los ritos funerarios parecen combinar en proporciones variables cuatro tipos principales de oposición: inhumación individual o colectiva, sepultura primaria o secundaria, dotación reducida o espectacular de ajuar fúnebre y, por último, la discreción o monumentalidad de la tumba. Toda especulación sobre los mecanismos sociales que pudieran subyacer a tales particularidades nos parece, por desdicha, prematura todavía.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LES ORIGINES DE L'EUROPE. LA RÉVOLUTION DU RADIOCARBONE. C. Renfrew. Editions Flammarion; París, 1983.

LA PROTOHISTOIRE DE L'EUROPE. LE NÉOLITHIQUE ET LE CHALCOLITHIQUE ENTRE LA MÉDITERRANÉE ET LA MER BALTIQUE. J. Lichardus y M. Lichardus-Itten. (Nouvelle Clio), PUF, París, 1985.

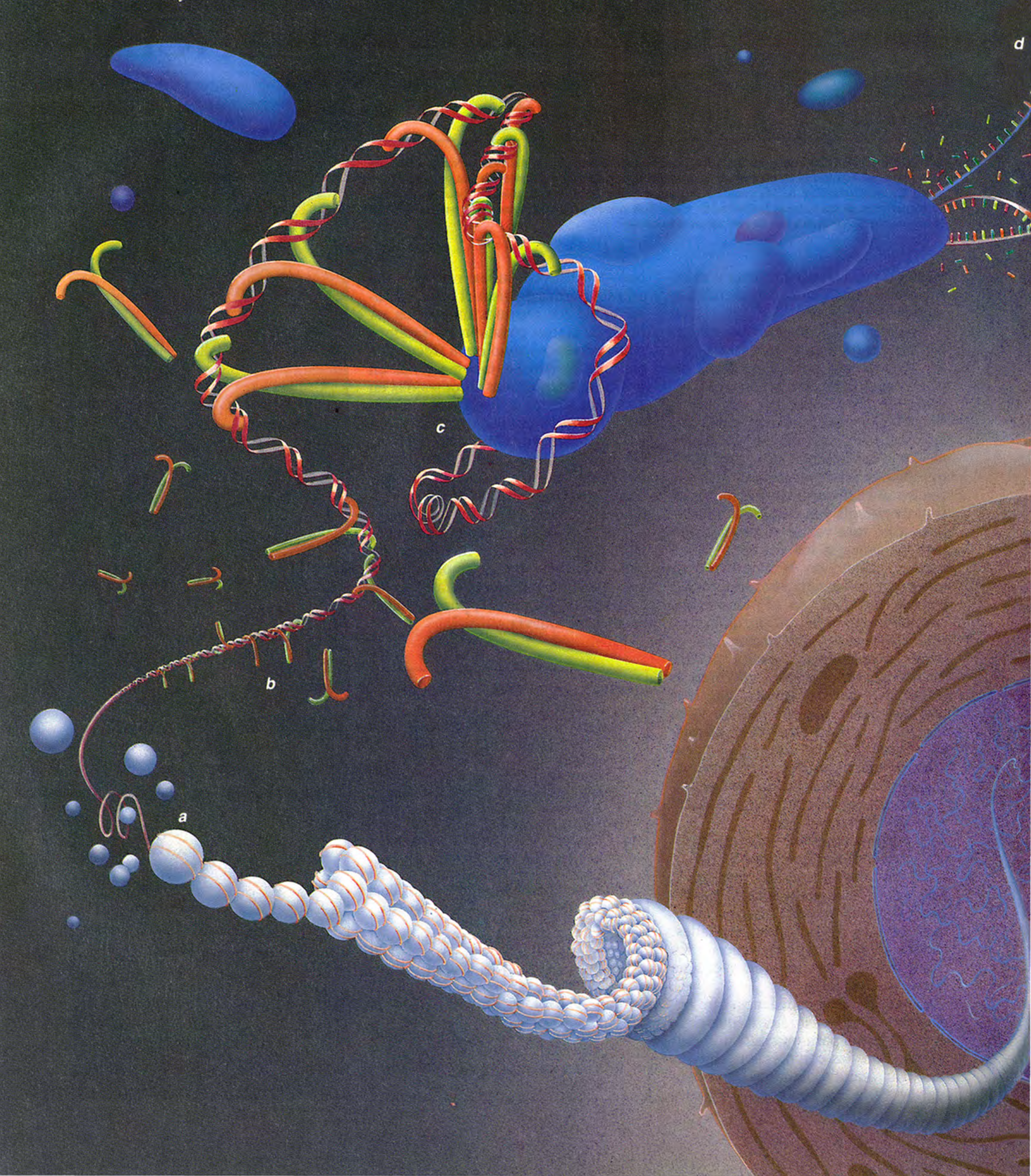
LA PLACE DES ALPES DANS LA NÉOLITHISATION DE L'EUROPE, EN NÉOLITHISATIONS. A. Gallay. (International series 516, Archeological series 5), dirigido por O. Aurenche y J. Cauvin, BAR, págs. 227-254, Oxford, 1989.

THE GENESIS OF MEGALITHS: MONUMENTALITY, ETHNICITY AND SOCIAL COMPLEXITY IN NEOLITHIC NORTH-WEST EUROPE, EN WORLD ARCHAEOLOGY. A. Sherratt. Vol. 22, n.° 2, págs. 147-167, 1990.

AU NÉOLITHIQUE. LES PREMIERS PAYSANS DU MONDE. C. Louboutin. (Découvertes Gallimard 98), Editions Gallimard, París, 1990.

GENES INTELIGENTES

Tim Beardsley





¿Por qué genes muy parecidos producen células tan distintas? La respuesta estriba en saber qué genes se activan y en qué momento, en conocer los mensajes químicos que controlan la diferenciación.

Desde hace medio siglo, los biólogos saben que, a medida que las células se van diferenciando, unos genes se activan y otros se inactivan, lo que posibilita que un simple óvulo fecundado se transforme en una flor, una mosca de la fruta o un ser humano. Durante el desarrollo de un organismo, las células se mueven, migran, siguiendo complejas estrategias, cambian su forma y terminan por asociarse para constituir tejidos especializados. Un ser humano, por ejemplo, tiene más de 250 tipos distintos de células, y cada una debe estar y funcionar en el lugar adecuado. (Las células hepáticas no servirían en el cerebro.) Todas, sin embargo, portan los mismos genes en su ADN.

Cómo se consigue armonizar la actividad de los genes de un organismo, para que las células se formen y funcionen en el sitio correcto, y en el momento preciso, ha constituido un misterio que ahora empieza a esclarecerse. Cientos de experimentos demuestran que el control de la expresión de la mayoría de los genes de un organismo se realiza casi siempre mediante la regulación de la transcripción, un proceso cuyo fin es copiar la información genética que contiene el ADN en ARN, que son las moléculas utilizadas para fabricar los millares de proteínas que determinan que una célula difiera notablemente de otra. Como afirma Eric H. Davidson, del Instituto de Tecnología de California, la principal enseñanza de la biología molecular de los últimos 20 años es la del control de la expresión génica mediante la regulación de la transcripción.

A él y a otros debemos el haber profundizado en el conocimiento de cómo se controla la transcripción en los organismos pluricelulares. Davidson ha acuñado la expresión ‘‘genes inteligentes’’ para designar los que responden a las combinaciones de señales enviadas de un gen a otro en las redes de control. Estudia ahora el ‘‘cerebro del gen inteligente’’, es decir, el complejo transcripcional, un complicado agregado de proteínas. Para que se inicie el proceso de la transcripción, las proteínas, que actúan como señales químicas, han de unirse al ADN en un sitio cercano al gen que debe transcribirse.

1. ACTIVACION DE LOS GENES DECISIVOS para la diferenciación celular mediante la formación de un complejo de proteínas que se unen a sitios específicos del ADN. El proceso comienza cuando el ADN se desprende de las histonas (a), que mantienen arrollado el ADN mientras no se utiliza. Los factores de transcripción (estructuras pares) se unen entonces al ADN (b). Forman un complejo transcripcional (c) que activa a las proteínas asociadas con la enzima encargada de transcribir el gen en una cadena de ARN (d).

Este tipo de complejo viene a ser una "computadora desgarbada", donde se combinan señales y se toma la decisión de si se activa o no un gen. En el caso de que la combinación de mensajes químicos —que pueden recibirse desde fuera de la célula— sea la adecuada, se activará la enzima que realice la transcripción y se producirá ARN.

Se suele trabajar con mosca de la fruta, gusanos microscópicos e incluso con bloques sueltos de proteínas. Pero hay razones poderosas para pensar que los resultados serán generalizables a todos los organismos, hombre incluido. En efecto, en todos los organismos pluricelulares parecen funcionar los mismos procesos básicos. El "gen inteligente" podría constituir una de las características universales de las que dependen los procesos de desarrollo embrionario.

Aparte de su interés teórico estricto, conocer los mecanismos mediante los cuales los genes controlan y son controlados puede ayudarnos a encontrar vías para combatir las enfermedades que se originan cuando los procesos no se llevan a cabo adecuadamente. Enfermedades que no se limitan a las patologías hereditarias, sino que incluyen también el cáncer y los síndromes de autoinmunidad. Cuando se conozcan mejor los sistemas de control que regulan los genes, se podrá diseñar drogas que activen o inactiven genes específicos: un auténtico salto cuántico que revolucionará la medicina.

Anteproyectos genéticos

La idea de que las señales químicas podían condicionar la actividad de los genes se remonta a los primeros días de la embriología. Cuando en el laboratorio se cortaba un trozo de tejido de un embrión de rana y se trasplantaba a otro sitio, el tejido trasplantado originaba a veces una estructura propia de su ubicación de partida: una rana, por ejemplo, con una extremidad fuera de su región. Pero si la manipulación del embrión acontecía en una fase precoz del desarrollo, entonces el animal se recuperaba de la "extirpación" y llegaba a término con normalidad.

Hasta 1960 no se contó con una explicación coherente del fenómeno; se la debemos a los experimentos realizados por François Jacob y Jacques Monod con la bacteria intestinal *Escherichia coli*. Se sabía que, en presencia del azúcar lactosa, *E. coli* producía rápidamente enzimas capaces de metabolizarla. Los investigadores franceses propusieron la existencia de una proteína que, en presencia de lactosa, activaba algunos genes que estaban inactivos.

"El genoma contiene no sólo una serie de anteproyectos", escribieron Jacob y Monod, "sino todo un programa coordinado de síntesis de proteínas y medios para controlar su ejecución". Su propuesta incluía también un punto clave: la proteína que controlaba el proceso era capaz de reconocer y unirse a una secuencia específica de bases, próxima a los genes sometidos a control. De esta forma, aseguraban, la proteína impedía la transcripción.

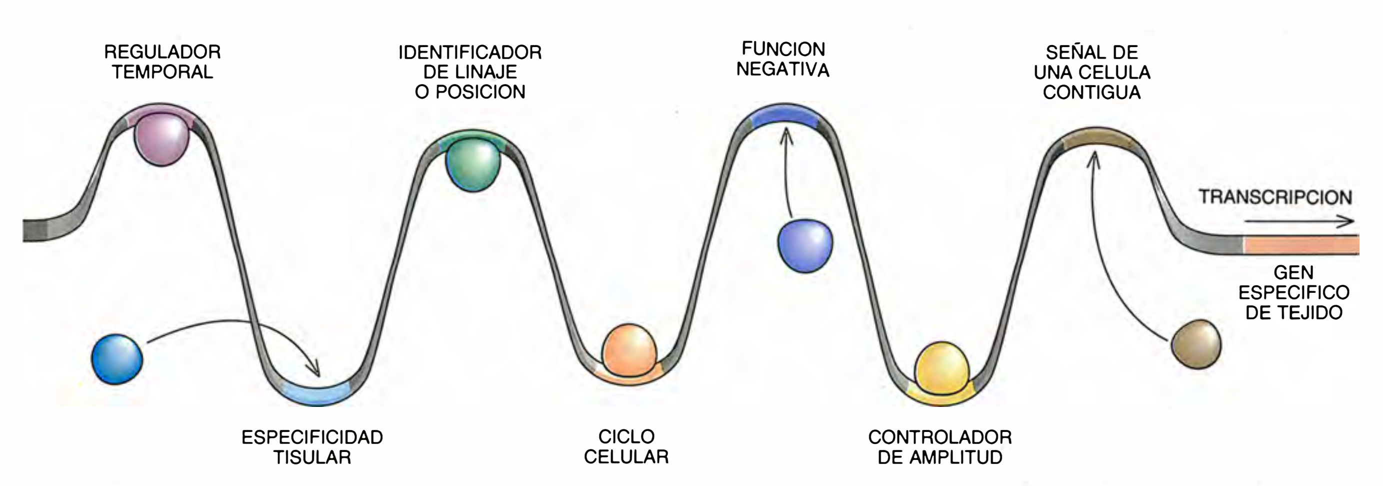
La hipótesis de Jacob y Monod se mostró acertada. Desde entonces, se han descubierto sistemas de control génico en *E. coli*, variantes en su mayoría del esquema inicial. En muchos de ellos participan genes que producen enzimas que metabolizan un nutriente o sintetizan algún otro compuesto que se encuentra en bajas concentraciones. En todos los casos, proteínas con capacidad de unirse al ADN se adhieren a sitios específicos del ADN bacteriano para reprimir o promover la transcripción de un gen que no suele quedar lejos.

La eficacia con que las proteínas enlazadas al ADN promueven o reprimen la transcripción depende de las concentraciones de dichas proteínas, que a su vez puede depender de multitud de factores. Aunque algunos mecanismos de control de la transcripción bacteriana son exquisitamente sensibles, su funcionamiento recuerda más el de un conmutador que el de una computadora. Reto muy distinto es el que plantea el control de los genes de un organismo pluricelular, de mecanismos más complejos.

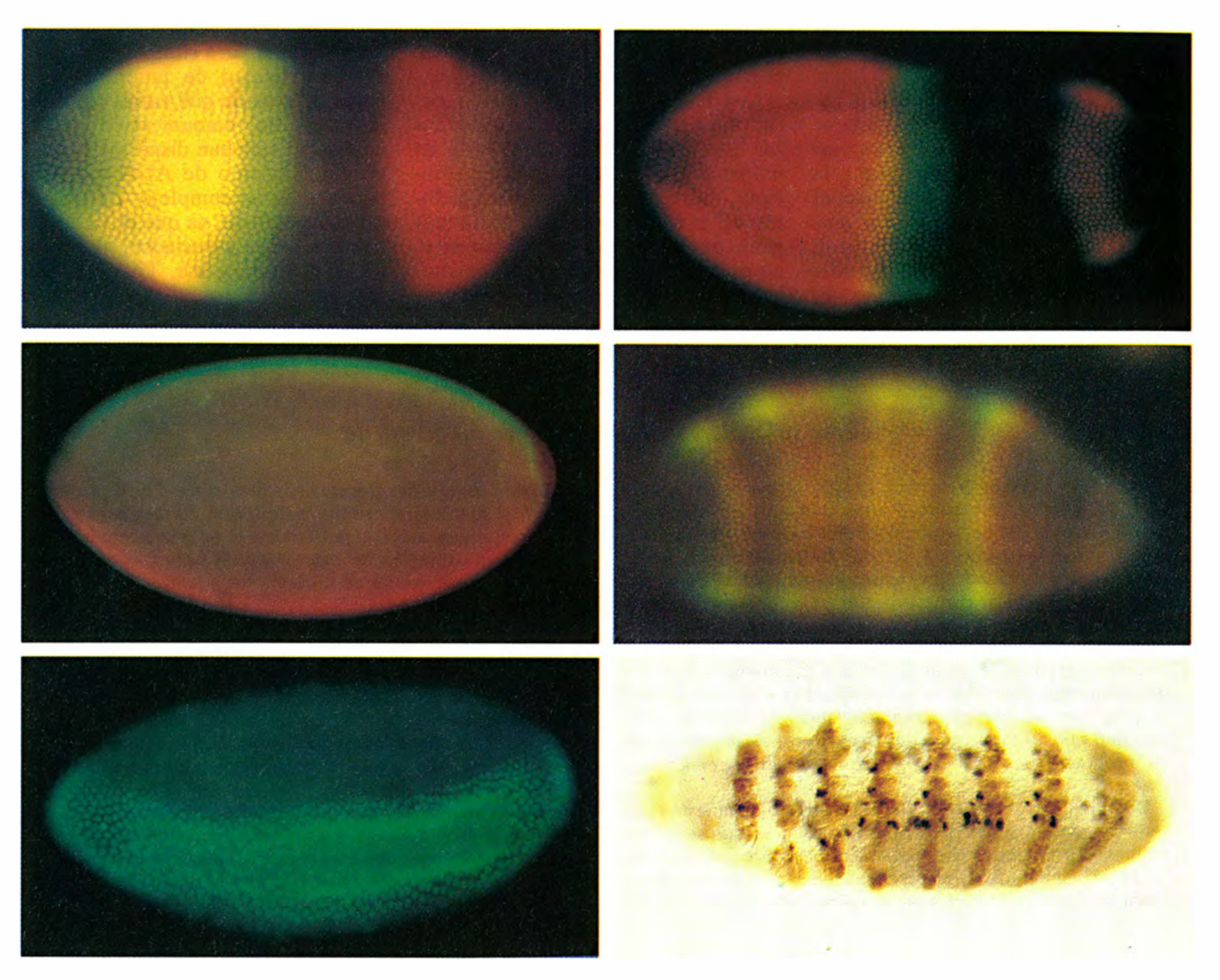
Las bacterias podrían utilizar la mayoría de sus genes durante su corta vida, activándolos o reprimiéndolos rápidamente, en respuesta a las condiciones cambiantes del medio. Por contra, una célula diferenciada de un organismo pluricelular utiliza sólo una pequeña proporción de sus genes. Si bien los cambios de actividad génica deben ser más escasos, porque los organismos pluricelulares se afanan por mantener un medio interno constante, no parece tarea fácil decidir qué genes han de activarse. Las células de un organismo complejo necesitan "saber" dónde están instaladas para decidir qué genes expresar. Y deberían, además, estar capacitadas para responder ante situaciones de emergencia, como una agresión o la súbita presencia de una hormona.

Por ser tan distintos los requerimientos de las bacterias en relación con las exigencias de los eucariotas, nadie se imaginaba que recurrieran a idénticos mecanismos fundamentales para controlar sus genes. Pero ocurre que las proteínas que se unen al ADN son las que se dan en eucariotas.

Desde los mismos comienzos de la investigación en el control transcripcional en eucariotas empezaron a aparecer fenómenos novedosos. Así,



2. GENES ESPECIFICOS DE TEJIDO se activan cuando los factores de transcripción se unen a una combinación adecuada de sitios para constituir un complejo único. Los sitios de unión se hallan espaciados a lo largo del cromosoma. Cada factor transmite una información específica.



3. EMBRIONES TEÑIDOS de *Drosophila* revelan cómo se activan selectivamente los genes en ciertas regiones durante el desarrollo. La proteína producida por *hunchback* se tiñe de verde; de rojo, la de *giant* (*arriba, a la izquierda*). *Zen* es verde y *dorsal*, roja (*centro, a la izquierda*). El color verde revela actividad de *twist* (*abajo, a la izquierda*). La proteína *hunchback* es roja y *Krüppel*, verde (*arriba, a la derecha*). La proteína *even-skipped* es verde y *hairy*, roja (*centro, a la derecha*). (El amarillo débese al solapamiento.) Un embrión de más edad muestra la proteína de *engrailed* (*bandas de color marrón*) y de *S59* (*puntos púrpura*), que preceden al desarrollo del músculo (*abajo, a la derecha*).

en 1982, Steven L. McKnight y Robert Kingsbury levantaron uno de los primeros mapas en los que se señalaban las regiones de ADN que afectaban a la transcripción de un gen en una célula eucariota. Utilizaron un gen de un virus herpes que se expresaba en ovocitos de la rana *Xenopus laevis*.

Provocaron mutaciones en las proximidades del gen, con la intención de averiguar qué regiones eran fundamentales para la transcripción normal del gen y, por tanto, intocables. Hallaron varias. Una estaba junto al "promotor", sitio muy próximo al lugar por donde la enzima encargada de la transcripción aborda su tarea. A tenor de lo conocido en bacterias, era éste un resultado esperado. Los otros dos sitios de interés quedaban lejos, en términos moleculares, uno a 50 y el otro a 100 pares de bases.

Resultaba extraño que a tanta distancia una proteína incidiera en la transcripción. Cabía, empero, sospechar que se tratara de sitios de engarce de proteínas. Sospecha que no tardó en confirmarse, cuando Robert T. N. Tjian aisló una proteína que estimulaba experimentalmente la transcripción de un gen en una célula eucariota; lo hacía mediante el enlace en otra secuencia de las bases del ADN. Tjian encontró que su proteína se unía a cinco sitios distintos en las proximidades de un gen vírico. Luego se vería que todos los genes eucariotas son muy parecidos en ese sentido.

A diferencia de las proteínas que se unen al ADN en bacterias, las de eucariotas suelen controlar la transcripción desde sitios de engarce muy alejados. Pronto se identificaron factores transcripcionales que se unían a puntos situados hasta a 40.000 pares de bases del gen diana, sin perder por ello la capacidad de estimular, o reprimir, la transcripción. También, a diferencia de las proteínas bacterianas que se unen al ADN, no importa tanto la posición exacta de los factores transcripcionales eucariotas. Pueden estar a cualquier lado del promotor, o incluso curso abajo del gen.

¿Cuántos reguladores?

Barbara R. Hough-Evans y otros que trabajan con Davidson se han ocupado del gen que produce la proteína actina en *Strongylocentrotus purpuratus* (erizo de mar). Hasta 20 regiones próximas al gen son reconocidas por proteínas reguladoras. Davidson y sus colaboradores han demostrado que cinco de ellas, por lo menos, deben estar con proteínas reguladoras para que el gen de la actina se transcriba. Han encontrado también otras dos regiones a las que deben unirse proteínas reguladoras para impedir la transcripción de dicho gen.

Según Davidson, cinco es el número medio de sitios reguladores en un gen de un organismo pluricelular. Parece como si la mayoría de los genes de los organismos pluricelulares tuviesen que montar una computadora proteica antes de proceder a la transcripción. Tjian sostiene que el promotor eucariota debe poseer muchos sitios de control, en tanto que el conmutador genético bacteriano más complejo que se conoce —analizado por Mark Ptashne y que controla la proliferación de un virus bacteriano— presenta sólo tres de esos sitios, justo donde se inicia la transcripción.

Los factores de transcripción eucariotas son además menos cuidadosos que los bacterianos a la hora de unirse al ADN. Lo que, en un principio, desconcertó a los investigadores: en el núcleo eucariota había más genes dentro de un volumen mayor y, no obstante, las proteínas se mostraban menos específicas. Dicho de otro modo, en los eucariotas los factores de transcripción podían mancomunar sus esfuerzos para compensar la falta de especificidad de unión. Pero la única manera de que varias proteínas entrasen en comunicación mutua cuando se hallaban dispersas a lo largo del filamento de ADN era agrupándose en un complejo. La idea no era descabellada, ya que el ADN que actuaba como espaciador, al ser flexible, podía plegarse. Tjian ha realizado electromicrografías en las que se aprecian esos bucles en preparaciones

Las infinitas enseñanzas de *Drosophila*

Esa mosca vulgar de la fruta ha sido la favorita de los genéticos durante más de 60 años. Su contribución actual a la biología del desarrollo no desdice de sus aportaciones a la teoría de la herencia. A lo largo de los últimos diez años se ha ido componiendo un cuadro bastante completo de las interacciones génicas que acontecen en las primeras fases del desarrollo embrionario de *Drosophila*.

El adulto está dividido en 17 segmentos, algunos con apéndices (alas o patas). Aunque las células que conforman el embrión son muy parecidas, si se transplantan a un sitio diferente, producen las estructuras características del lugar de partida. Dato que atestigua que, desde muy pronto, las células están programadas para crear estructuras de un segmento concreto.

Durante las primeras fases del desarrollo se manifiestan una serie de genes a través de bandas de proteínas que se tornan visibles con tinciones especiales. Las bandas dividen al embrión en segmentos. El proceso comienza cuando las células nutricias maternas secretan en el huevo ARN del gen *bicoid*. El ARN permanece confinado en un extremo del huevo; traducido allí en proteína, ésta se van propagando por el huevo. Al mismo tiempo, ARN de otro gen materno, de nombre *nanos*, difunde en la dirección contraria.

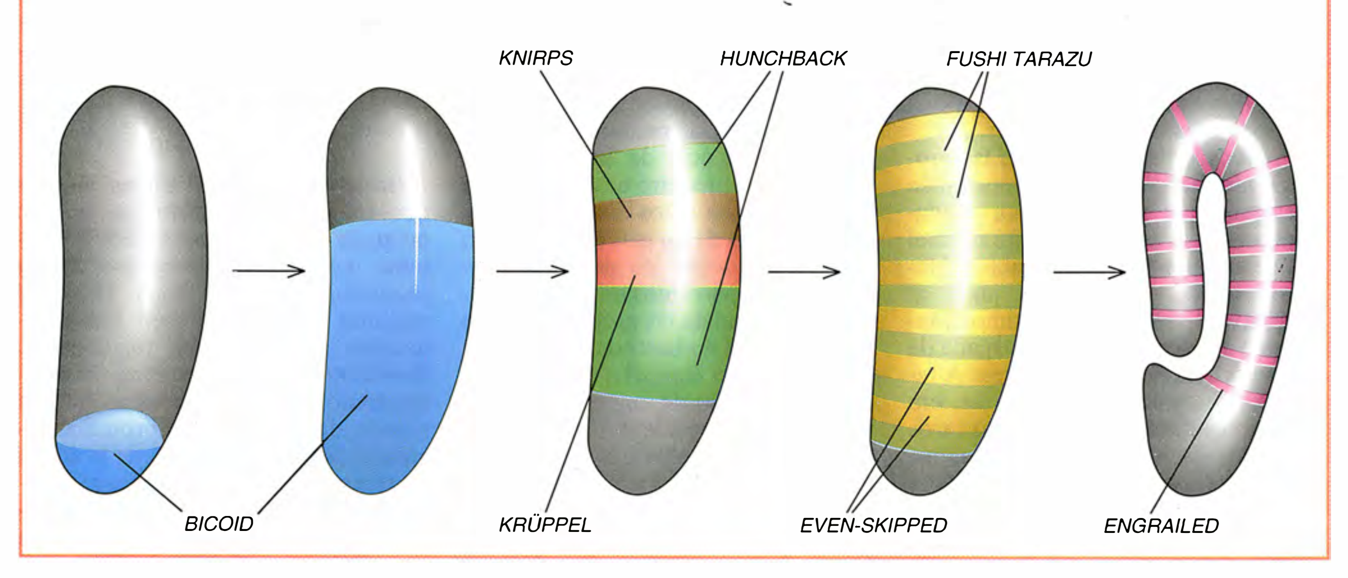
La proteína *bicoid* estimula, mediante una adecuada combinación de activaciones y represiones, la transcripción de los genes gap. Son éstos los primeros genes propiamente del embrión que desempeñan un papel en la configuración del patrón de desarrollo. Se forman cuatro bandas anchas, dos de proteínas *hunchback*, separadas por otras de proteínas de los genes *Krüppel* y *knirps*. Christiane Nüsslein-Volhard y Wolfgang Driever, del Instituto Max Planck de Biología del Desarrollo de Tubinga, han puesto de relieve el papel de la proteína *bicoid*; si se la altera, cambia la expresión de los genes gap.

Los genes gap ceden el paso a siete bandas solapantes, producto de la expresión de *even-skipped*, *hairy* y *runt*. Posteriormente, siete bandas de proteína *fushi tarazu* alternan con siete de *even-skipped*. Todavía más tarde, aparecen 14 bandas más estrechas de proteína *engrailed*. Cada banda parece representar una combinación de genes activos. Se cree que otros genes, la mayoría todavía desconocidos, responden a estas combinaciones produciendo las estructuras especializadas de cada segmento.

Mientras acontece todo ello, una jerarquía distinta crea en el embrión un eje dorso-ventral, proceso fundamental para que se produzcan diferentes tipos de tejidos. En el proceso interviene un gradiente de producto del gen *dorsal*, capaz de obrar como *bicoid*. Luego, los genes denominados *twist* y *snail* se expresan en regiones específicas del eje dorso-ventral.

Algunos de los genes implicados en el desarrollo parecen contrarrestar el efecto de otros. Otros operan en concierto. Muchos se autorregulan: una vez activos, ellos mismos se siguen autoactivando, hasta que ocurre algo que los inactiva. Y otros, como *even-skipped*, cumplen misiones diferentes en momentos distintos.

Los biólogos que trabajan con otros organismos singularizan el caso de *Drosophila* porque sus paredes celulares se forman bastante tarde, dando tiempo a las proteínas para crear gradientes de concentración. Sin negarlo, Nüsslein-Volhard replica que las células pueden también crear los equivalentes a los gradientes, si hay entre ellas diferencias cuantitativas en las señales que reciben. Está convencida de que los animales más complejos poseen también gradientes.



de complejos transcripcionales. Ha visto, además, que para que el sistema funcione es preciso que concurran siempre cinco proteínas, por lo menos.

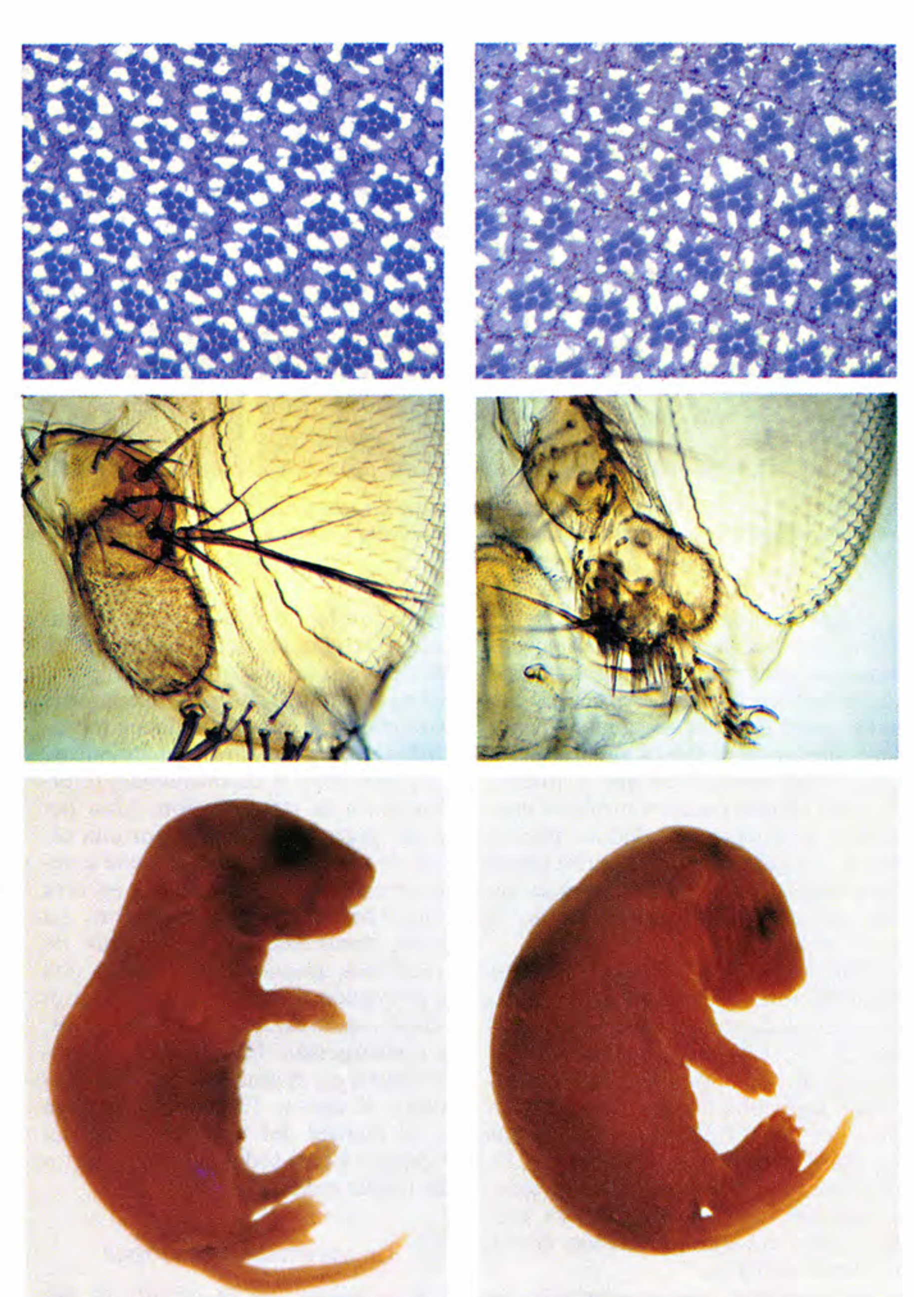
Sin embargo, estas proteínas obligatorias no son suficientes por sí solas para la regulación normal de la transcripción. Se necesita la compañía del complejo formado por los factores de transcripción, situado junto al gen. Sólo cuando coinciden todos los componentes —proteínas obligatorias, enzima y la combinación justa de factores transcripcionales específicos— se realizará la transcripción controlada del gen inteligente.

Se han encontrado ya varios cientos de factores transcripcionales distintos. Unas dos terceras partes de los mismos se pueden clasificar en grupos, según su estructura molecular: hélice-vuelta-hélice, dedos de cinc, cremalleras de leucina, hélice-bucle-hélice. El resto corresponde a proteínas solitarias, algunas específicas de un tipo particular de tejido.

Ptashne y Kevin Struhl diseñaron ingeniosos experimentos en los que producían factores de transcripción híbridos. Y aunque las generalizaciones son peligrosas, demostróse con los ensayos que los factores de transcripción tienen al menos dos regiones: la que reconoce secuencias específicas de ADN y se une a ellas y la que se considera responsable del efecto activador.

Abre muchos interrogantes la forma de funcionar del complejo transcripcional, entendido como "cerebro" del gen inteligente. Se exige, tal parece, cierto "quorum" de factores transcripcionales; pero no hay modo de plasmar en imágenes la interacción mutua de hasta 20 proteínas.

Se admite que los factores transcripcionales se presten mutuo auxilio para unirse al ADN. Tjian afirma haber aislado un tipo de proteína (la llama coactivador) que reúne a los factores transcripcionales específicos de secuencia con la enzima que realiza la transcripción y las proteínas asociadas. No todos se lo acaban de creer. Ptashne, por ejemplo, piensa que la propuesta de Tjian se funda en una concepción errónea del funcionamiento de los factores de transcripción.



4. ESTRUCTURAS ANORMALES derivadas de mutaciones sufridas por los genes del desarrollo. Arriba a la izquierda se ofrece un ojo normal de *Drosophila*. A la derecha, otro con mutaciones en el gen *sevenless*; a los grupos de fotorreceptores les falta una de las siete células. El trasplante en *Drosophila* de un gen con una secuencia homeótica de ratón produce pata (*centro derecha*) donde una mosca normal presenta antena (*izquierda*). Abajo a la izquierda, una cría normal de ratón; a la derecha, una deforme, con mutaciones en un gen homeótico.

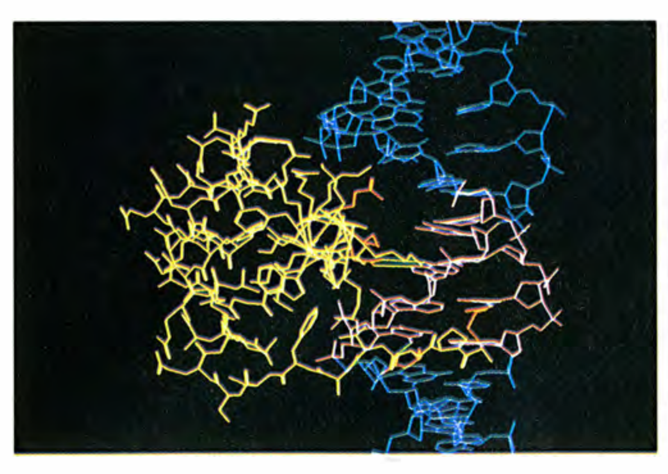
Mezcla de señales

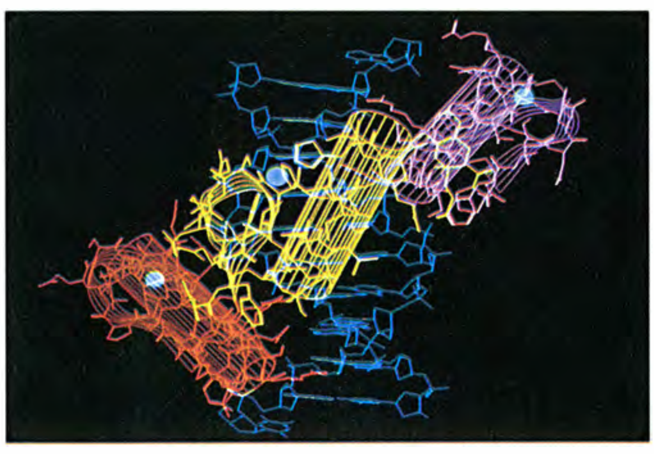
Aunque los detalles estén por aclarar, no cabe duda de que el complejo transcripcional determina cuándo hay que transcribir un gen. Y ello podría explicar las observaciones de los embriólogos, según las cuales habría señales extracelulares e intracelulares que intervendrían en la activación o inactivación de un gen.

Si una célula posee la combinación adecuada de factores de transcripción para un gen particular, el complejo se formará y comenzará la transcripción del gen inteligente. Diferentes tipos de señales podrían procesarse así: información sobre linajes, interacciones con otras células, estado del ciclo de división celular, etc.

Los genes inteligentes ofrecen también una salida a un difícil problema, que ha traído de cabeza a los teóricos. Si cada gen de un organismo debe tener su propia proteína controladora, ¿cómo regular la síntesis de tantas proteínas? Ahora bien, si se admite la interacción mutua entre varias proteínas reguladoras, bastarían unas pocas para controlar muchos genes.

Muchos factores transcripcionales están formados por dos subunidades. Este rasgo dimérico aumenta el número de genes que pueden controlar. Como las dos subunidades no tienen por qué ser idénticas, con un grupo limitado de subunidades se crean muchos dímeros distintos; bastan cuatro subunidades, *A*, *B*, *C* y *D*, para formar diez dímeros: *AA*, *AB*, *AC*, *AD*, *BB*, *BC*, *BD*, *CC*, *CD* y *DD*.







5. MODELOS DE COMPUTADORA en los que se ilustra la unión de los factores de transcripción al ADN. A la izquierda, una proteína homeótica (*en amarillo*) se une al ADN (*azul y lila*). A la derecha, una proteína del tipo dedos de cinc (*naranja, amarillo y lila*) que se une al ADN (*azul*).

No es posible decir cuántos genes diferentes podrían controlar los diez dímeros, sin saber exactamente cómo funcionan los complejos transcripcionales, pero podrían ser cientos, sobre todo si el sistema tolera algunos errores. Y hay indicios de que sí puede. Muchas células parecen producir cantidades pequeñas de algunas proteínas sin función conocida. Quizá son el resultado de imprecisiones que no afectan al sistema de control de la transcripción.

Aunque en los estudios primeros sobre factores de transcripción eucariotas se utilizaron genes simples, los complejos transcripcionales desempeñan un papel fundamental en sistemas más complicados, como podemos ver en el trabajo con levaduras de Ira Herskowitz y Alexander D. Johnson. Organismo unicelular éste, posee, sin embargo, estructura cromosómica eucariota y existen distintos tipos celulares.

De esos tipos, uno es asexuado. Se multiplica por gemación, dividiéndose simplemente en dos, para producir descendientes idénticos. Los dos tipos celulares restantes son formas sexuales, que se producen en condiciones desfavorables, y que pueden cruzarse entre sí. Herskowitz y Johnson han desentrañado los controles genéticos que dan razón de esa disparidad triple. El principal locus de control es un factor de transcripción que regula los genes que se expresan de manera diferente en los tres tipos.

El esquema de control es complejo y elegante, a un tiempo. El factor transcripcional fundamental está constituido por un dímero, cuyas subunidades pueden ser idénticas o distintas. Un dímero integrado por dos subunidades distintas hace que la célula sea asexual, porque reprime todos los genes necesarios para que se formen los tipos sexuales. Si el dímero consta de subunidades idénticas, se activan los genes utilizados en los tipos sexuales.

Las levaduras utilizan feromonas para coordinar sus actividades reproductoras; estos mensajeros químicos, muy parecidos a las hormonas, intervienen en la transcripción. Una pequeña proteína secretada por una célula de un "tipo sexual" se une a receptores especiales presentes en otra célula del tipo sexual contrario. La unión desencadena una cascada de reacciones químicas que termina con la activación de otro factor transcripcional especializado. Provoca, pues, la convergencia de los genes que intervienen en el cruzamiento. En conjunto, al menos 13 genes participan en el control del tipo celular en levaduras, y casi todos ellos son factores transcripcionales.

La secuencia homeótica

A principios de la década de los ochenta, nadie dudaba de la importancia de los factores transcripcionales eucariotas. Pero era difícil hallar ejemplos que destacaran su interés en los procesos de desarrollo. Los biólogos no sabían qué secuencias genéticas buscar, hasta que, en 1983, el laboratorio de Walter J. Gehring y, por separado, Matthew P. Scott, realizaron un descubrimiento crucial.

Estudiaban un grupo de genes de la mosca de la fruta, *Drosophila*, cuya mutación provocaba que, en los segmentos de los adultos, se desarrollasen estructuras erróneas. El gen *Antennapedia*, por ejemplo, determinaba la formación de patas allí donde correspondía haber antenas. Scott, en Colorado, y Ernst Hafen, Michael Levine y William J. McGinnis, en Basilea, descubrieron que varios de estos genes, denominados genes homeóticos, contenían una secuencia característica de bases, que desde entonces es conocida como la secuencia homeótica ("homeobox").

La secuencia homeótica es un punto de referencia fundamental, ya que es algo concreto que los genéticos moleculares pueden buscar. Una vez identificada una secuencia en el seno de un gen, se hallan las secuencias similares en los cromosomas, cuya existencia se explica por las mutaciones que provocan la duplicación de un gen; si una copia duplicada no es perjudicial, puede evolucionar con el tiempo y adquirir una nueva función. Y si el nuevo gen vale la pena, podrían perpetuarlo las nuevas especies.

No tardaron en descubrirse secuencias homeóticas, o similares, por todas partes. *Drosophila* tenía varias copias, todas ellas en genes relacionados con el desarrollo. Pero no acababa ahí el interés del asunto. La ordenación física de los genes homeóticos a lo largo del cromosoma se correspondía bastante bien con el orden de sus dominios de actividad a lo largo del cuerpo.

Muy pronto también, McGinnis y otros encontraron secuencias parecidas a las homeóticas en otros organismos: escarabajos, gusanos, ranas, gallinas, ratones y hasta en el hombre. En todos ellos, se conservaba la ordenación génica en el cromosoma, así como la propia secuencia homeótica. No sólo en invertebrados y vertebrados: se ha descubierto recientemente una variante (algo alterada) en el desarrollo de las plantas.

La tenaz conservación de la secuencia homeótica, durante miles de millones de años, abonaba la idea de atribuirle una función principal. Lo que se ratificó en 1984, cuando Allen Laughon advirtió que la región proteínica determinada por la secuencia homeótica guardaba cierto parecido con las secuencias de las proteínas

bacterianas que se unen al ADN, y con las proteínas implicadas en el tipo sexual de las levaduras. Las similitudes llevaron a Laughon y Scott a proponer que la secuencia homeótica determinaba un fragmento de proteína, que llamaron dominio homeótico, capaz de unirse al ADN.

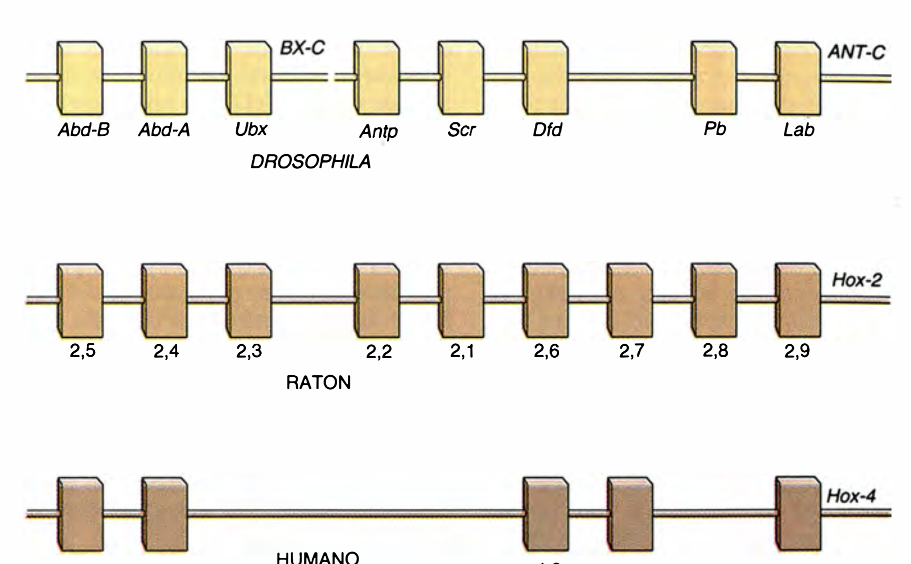
No mucho después, Patrick H. O'Farrel y Claude Desplan aportaron pruebas de que las proteínas homeóticas se unían, en efecto, al ADN. En 1988, O'Farrel dio el último paso, al demostrar que las proteínas producidas por *fushi tarazu* (en japonés, "falto de segmentos"), un gen homeótico de *Drosophila*, y por otro gen homeótico, no sólo se unían al ADN, sino que activaban y reprimían la transcripción de genes próximos. Las pruebas ulteriores apuntaban en la misma dirección. En definitiva, los genes homeóticos producían factores de transcripción que controlan genes en organismos pluricelulares.

Una cosa es mostrar un fenómeno en el tubo de ensayo y otra, muy distinta, demostrarlo en la naturaleza. McGinnis y su colega Michael A. Kuziora acaban de poner sobre el tapete el interés de un dominio homeótico, recurriendo a un animal vivo. Sustituyeron la secuencia homeótica de un gen de *Drosophila* por una secuencia homeótica, ligeramente distinta, de otro gen, para que el gen quimérico se expresara en el insecto. Y nació una larva cuyos segmentos de la cabeza parecían segmentos torácicos. El dominio homeótico introducido reconocía una región específica del ADN y se unía a ella.

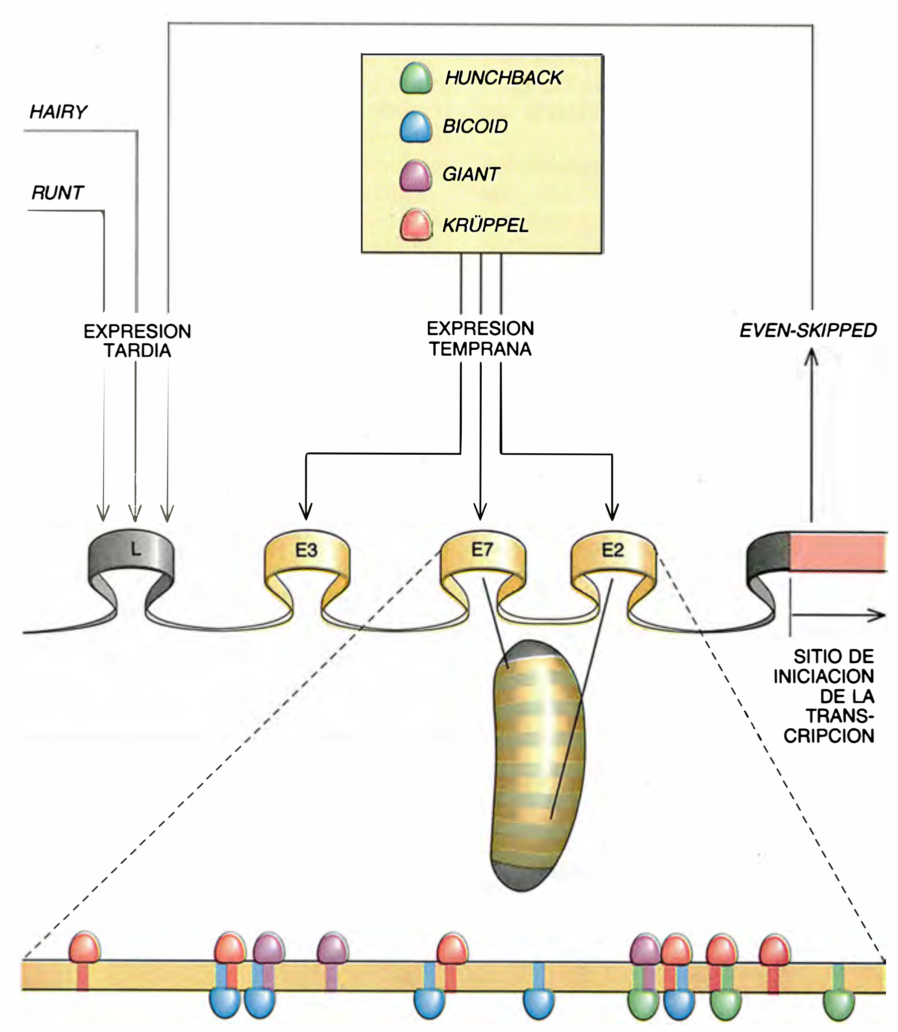
Jerarquía de genes

El refinamiento de las técnicas para identificar productos génicos ha permitido decubrir cierta jerarquía, sorprendente, compleja y enmarañada, de genes implicados en la ejecución del plan corporal de *Drosophila*. Muchos son genes homeóticos. En las primeras horas del desarrollo, tras la fecundación, el embrión elipsoidal se subdivide progresivamente en diferentes direcciones. Las proteínas producidas por esos genes forman gradientes de concentraciones que activan o inactivan a otros genes, según Martin Hülskamp y Diethard Tautz.

Los genes inteligentes hablan mucho unos con otros durante el desarrollo. El proceso se repite a escalas sucesivamente decrecientes, hasta configurar bandas de expresión proteínica. Cada banda posee una combinación peculiar de genes activos, y es probable que éstos determinen qué genes deben activarse en cada segmento de la mosca adulta.



6. GENES HOMEOTICOS con secuencias similares aparecen en el mismo orden en los cromosomas de especies diversas. La ordenación a lo largo del cromosoma es la misma que la de las regiones de actividad en el cuerpo. Por ejemplo, el *Abd-B* de *Drosophila* y el *Hox 2.5* de ratón son activos en el extremo posterior del embrión.



7. ACTIVACION del gen *even-skipped* de *Drosophila*. Requiere el concurso de varios factores transcripcionales, producidos por otros genes. Las regiones E7 y E2 (*aumentadas abajo*), que controlan las bandas 7 y 2 de *even-skipped* durante el desarrollo temprano, contienen muchos sitios donde se unen proteínas *hunchback*, *bicoid*, *giant* y *Krüppel*. Una actividad posterior (*L*) es controlada por *hairy*, *runt* y la propia *even-skipped*.

Uno de los genes homeóticos de esta jerarquía se llama *even-skipped*, denominación que alude al hecho de que algunos mutantes carecen de segmentos pares. La proteína *even-skipped* aparece primero en siete bandas, muy poco definidas, que subdividen al embrión. Posteriormente, las bandas se van haciendo más precisas. Mutaciones en el gen *even-skipped* condicionan la actividad de otro gen, situado más abajo en la jerarquía, el *engrailed*. El gen *even-skipped* es afectado, a su vez, por genes situados curso arriba en la misma jerarquía: *hunchback*, *Krüppel*, *giant* y *bicoid*.

El equipo harvardiano de Tom Maniatis, junto con Levine han encontrado que el gen *even-skipped* posee varias regiones a las que se unen proteínas reguladoras, que controlan la expresión del gen. Una de esas regiones, que controla la aparición temprana de cierta banda *even-skipped*, tiene sitios que reconocen las proteínas *bicoid*, *hunchback*, *Krüppel* y *giant*. Una serie distinta de proteínas, que se unen a otros sitios, controlan la expresión tardía de *even-skipped*. Y esto es sólo el principio; casi con toda seguridad cada una de las siete bandas posee su propia batería de proteínas reguladoras.

El número de genes de vertebrados con contrapartida equivalente en *Drosophila* parece aumentar cada semana. El producto del gen *dorsal* de *Drosophila*, por ejemplo, es similar a un factor de transcripción de mamíferos, designado NF-*k*B, que participa en una "respuesta de emergencia". Darnell y su grupo han descubierto un factor de transcripción específico de hígado, muy afín al producto de un conocido gen homeótico de *Drosophila*, *fork-head*, que se expresa en las células precursoras del aparato digestivo de la mosca. Estas células dan lugar al equivalente al hígado en *Drosophila*, el cuerpo graso.

En los últimos años se han realizado ingeniosos experimentos para comprobar si la similitud de secuencias reflejaba un paralelismo de funciones. Se han trasplantado genes del desarrollo (o parte de ellos) de una especie a otra. McGinnis introdujo en *Drosophila* un gen de ratón equivalente a *Antennapedia*, y promovió deliberadamente la sobreexpresión del mismo. Las moscas nacieron con defectos "casi idénticos" a los producidos por la sobreexpresión de su propio *Antennapedia*: patas donde debía haber antenas. Introdujo también en *Drosophila* un gen homeótico humano similar a otro encontrado en el insecto. Cuando el gen humano se sobreexpresa deliberadamente en *Drosophila*, produce deformaciones en la cabeza, del tipo de las provocadas por la sobreexpresión del gen equivalente de la mosca.

A principios de este año, Osamu Chisaka y Mario R. Capecchi obtenían pruebas directas del papel de los genes homeóticos en mamíferos. Manipularon un gen homeótico de ratón, y nacieron embriones de ratón que sólo portaban la versión alterada del gen. Los ratoncitos, que sobrevivieron sólo unas horas, aparecieron con terribles malformaciones en el corazón y la garganta, y carecían de algunas glándulas. Las malformaciones recordaban las que caracterizan al síndrome de DiGeorge, una enfermedad humana rara.

Pero no se crea que será tarea fácil deducir las implicaciones de todo ello con las enfermedades humanas relacionadas con el desarrollo. Se anda a oscuras en lo concerniente a los genes de mamíferos que gobiernan las primeras fases del desarrollo. Ignorancia que reina también sobre la mayoría de los genes situados en el extremo opuesto de la jerarquía de control: los que gobiernan la identidad de los tejidos específicos.

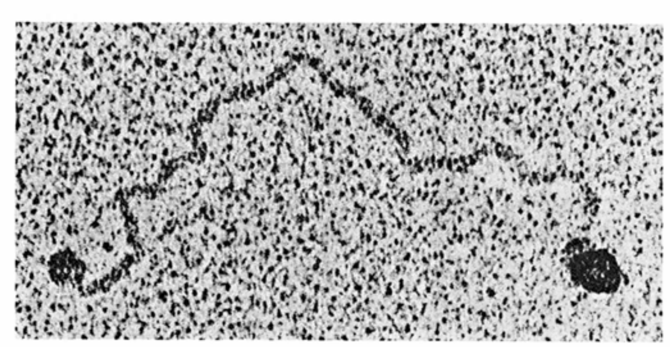
Con una excepción reseñable. Me refiero al gen de mamíferos *MyoD*, investigado por Harold Weintraub y sus colegas. *MyoD* es un potente factor de transcripción que puede, sin ninguna ayuda, convertir células en músculo. (Maniatis y su grupo halló recientemente un gen de *Drosophila*, *nautilus*, con una secuencia similar a *MyoD*, que también se expresa en células destinadas a ser músculo.)

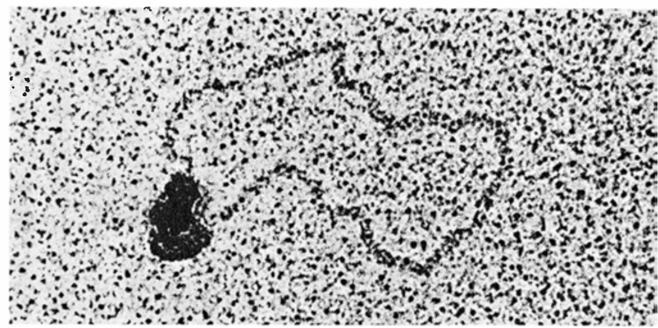
El descubrimiento de que muchos de los genes fundamentales para el desarrollo sean factores de transcripción refleja la misión destacada que cumple al control transcripcional. Pero hay otros genes, importantes desde el punto de vista del desarrollo, que afectan también a la transcripción indirectamente.

El año pasado, Andrew P. McMahon, del Instituto Roche de Biología Molecular, y Allan Bradley, de la Facultad de Medicina Baylor, se preguntaban si un gen de ratón, designado *Wnt-1*, similar a otro gen de *Drosophila*, *wingless*, tenía algo que ver en el desarrollo del sistema nervioso de los mamíferos. Promovieron la formación de embriones de ratón con dos genes *Wnt-1* defectuosos; aparecieron sin una parte importante del cerebro. Ocurre, sin embargo, que *Wnt-1* no determina ningún factor de transcripción; de acuerdo con todos los indicios, sí especifica una sustancia difusible que afecta a la transcripción en células vecinas.

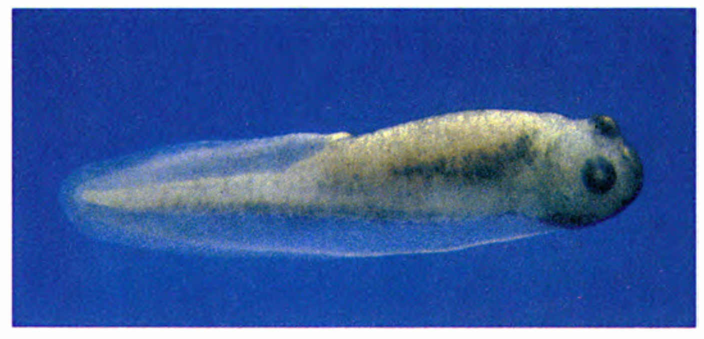
Se conocen bastante bien ciertas señales extracelulares que provocan la respuesta de los genes inteligentes. Las hormonas esteroides y la vitamina D, por ejemplo, viajan desde el exterior de la célula hasta su núcleo, donde se unen a los receptores para formar factores de transcripción activos. De otras muchas moléculas vitales, que actúan como señales, sabemos muy poco. Me refiero a los "factores de crecimiento" y las moléculas de adhesión. Estas moléculas señalizadoras prefieren unirse a los receptores de la superficie celular, desde donde enviarían su mensaje al núcleo.

Gerald M. Rubin investiga la red de interacciones entre determinaciones específicas de linajes celulares y señales difusibles que rige el destino de las células fotorreceptoras de los ojos de *Drosophila*. Las células forman grupos de ocho miembros, pero





8. FACTORES TRANSCRIPCIONALES (*grandes borrones*) pegados en los extremos de una cadena de ADN, en la fotomicrografía de la izquierda. Bajo ciertas condiciones, los factores transcripcionales se unen y forman un complejo, lo que origina un bucle en el ADN (*derecha*).




9. RENACUAJO NORMAL de rana africana, a la izquierda. Si al embrión se le inyecta ARN de activina humana, se forma un eje adicional (*derecha*). El ARN determina una sobreproducción de activina, que afecta a los genes del desarrollo.

en los mutantes afectados en un gen denominado *sevenless* falta el séptimo miembro del grupo. El gen *sevenless* determina un receptor de la séptima célula, cuya función consiste en recibir una señal de las células vecinas, gracias a la cual aquélla adquiere su identidad. Si el gen está alterado, la señal no se recibe.

H. Robert Horvitz defendía que las moléculas implicadas en la comunicación celular en los animales sencillos operaban, asimismo, en los organismos superiores, tesis a la que acaba de dar soporte demostrando que el gen *let-60* es uno de los varios conmutadores que gobiernan el desarrollo de las seis células precursoras de la vulva en el gusano microscópico *Caenorhabditis elegans*.

Claves del cáncer

Let-60, que como el gen *sevenless* de *Drosophila* determina un componente de una ruta de señales, se parece a un oncogén humano, esto es, un gen que puede causar cáncer. La verdad es que no constituye ninguna sorpresa que muchos oncogenes sean formas mutadas de genes que intervienen en el desarrollo y determinen factores de transcripción u otras moléculas implicadas en las señales ligadas al desarrollo que afectan a la expresión génica. El gen *Wnt-1* de ratón de McMahon y Bradley, por ejemplo, tiene una forma oncogénica; lo mismo que dos importantes factores de transcripción de la "respuesta precoz", *fos* y *jun*, que se activan cuando las células de mamíferos responden a factores de crecimiento.

Las correspondencias entre genes que controlan la transcripción y sustancias ligadas al cáncer afloran con una regularidad casi monótona. Douglas A. Melton, de Harvard, ha demostrado que el factor de crecimiento activina activa genes homeóticos durante el desarrollo de la rana *Xenopus*. Durante el desarrollo del animal, las células saben dónde están gracias a la formación de gradientes de activina; eso se infiere de su ensayo: cuando Melton manipuló los niveles de activina en embriones se alteraron los ejes corporales.

El ácido retinoico desempeña en aves y mamíferos un papel semejante al de la activina en *Xenopus*. El año pasado se hallaron pruebas de la producción de cierta forma de leucemia por parte de un receptor del ácido retinoico mutado.

Histonas

En el ámbito de la regulación génica los factores de transcripción han quitado protagonismo a las histonas, proteínas presentes en grandes cantidades en el núcleo eucariótico y que concentraron la atención a principios de la década de los ochenta. Mientras no se transcribe, el ADN permanece arrollado en torno a las histonas, formando los nucleosomas. El ADN empaquetado en nucleosomas es la cromatina.

A pesar de la reticencia de algunos, las histonas comienzan a encontrar acomodo en el nuevo marco explicativo general. Ptashne, por ejemplo, reconoce que los nucleosomas imponen una barrera inespecífica a la transcripción, aunque cree improbable que ello obligue a introducir cambios profundos en los modelos sobre control génico basados en los complejos transcripcionales. James T. Kadonaga estudia la lucha de histonas y factores de transcripción por acceder al ADN, y sí prevé un cambio drástico en los puntos de vista tradicionales sobre activación génica. Robert E. Kingston y sus colegas, del Hospital General de Massachusetts, han demostrado que algunos factores de transcripción compiten mejor que otros.

Las histonas podrían ser un componente esencial de los genes inteligentes. Tjian plantea un problema que los modelos basados exclusivamente en los complejos de transcripción no suelen explicar: ¿qué le impide a un factor de transcripción activar todos los genes que están a su alrededor?

Las respuestas no han tardado en llegar. Rebecca Kellum y Paul Schedl han demostrado que en *Drosophila* ciertas secuencias parecen aislar a algunas regiones cromosómicas de las influencias externas. En su opinión, las secuencias aislantes podrían afectar al empaquetamiento del ADN en nucleosomas. Dorothy Tuan, de Harvard, fue quien primero reparó en lo que podría ser la otra cara de las regiones aisladas. Según ella, tales regiones podrían facilitar la transcripción de grandes segmentos de ADN.

Michael Grunstein sentencia que los factores de transcripción que se unen al ADN son sólo una parte de la historia; para él, las histonas forman parte del aparato de transcripción. Grunstein ha demostrado que ciertas partes de las histonas deben permanecer intactas para que se pueda controlar la transcripción. Y empieza a pensar que la transcripción es un proceso con dos etapas. En la primera, se desmontan los nucleosomas; en la segunda, intervienen los factores de transcripción.

Con el resurgir del interés por las histonas, comenzamos a ensamblar las piezas del sistema. Mas, aun cuando se desentrañe en los próximos años el control de la transcripción, y se conozca perfectamente el cerebro de los genes inteligentes, no debemos olvidar que la transcripción no es el único modo de regular genes. Procesos que vienen más tarde, como los que introducen nucleótidos en secuencias ya transcritas de ARN ("RNA editing"), añaden un nuevo nivel de complejidad, que mantendrá viva nuestra atención.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NUCLEOSOMES: REGULATORS OF TRANSCRIPTION. Michael Grunstein en *Trends in Genetics*, vol. 6, n.º 12, págs. 395-400, diciembre de 1990.

PATTERN FORMATION DURING ANIMAL DEVELOPMENT. Douglas A. Melton en *Science*, vol. 252, págs. 234-241, 12 abril de 1991.

Juegos matemáticos

Por amor del cielo, ¿qué es un reloj de sol digital?

Ian Stewart

El hermano Benjamín disfrutaba con el trabajo que la orden de los monjes euclídeos le había encomendado. Creía con devoción en su máxima solemne: *Salus per geometriam*, "La salvación a través de la geometría". Poseía un don especial para crear fractales, talento que en la actualidad estaba aplicando a la iluminación de un manuscrito. Encontrábase dibujando el árbol de la vida, entrelazando sus ramas a través de una gran O mayúscula trazada en oro; a cada rama del árbol le añadía exactamente otras dos menores. Lo mismo que los fractales, lo mismo que la vida, el árbol era limitado en extensión, pero infinito en complejidad y detalle.

El chasquear de unas sandalias de cuero sobre las pétreas losas hizo que Benjamín se volviese a ver quién venía. ¡Ay, Dios! ¡El hermano Daniel! Benjamín le rehuía. Daniel nunca dejaba de meter sus nada chatas narices en los asuntos ajenos. Pero en esta ocasión era portador de un mensaje importante: "El abad requiere tu presencia", dijo.

La mano de Benjamín comenzó a temblar; tuvo que dejar el pincel antes de que el árbol de la vida se tornara en las zarzas ardientes. Las convocatorias del abad siempre suponían malas noticias. De camino por los resonantes claustros del monasterio matemático se esforzó desesperadamente en recordar qué faltas podría haber cometido o qué cálculos haber echado a perder.

Se detuvo un instante en el umbral de la puerta del abad. Después, tras erguir la espalda y fortalecer su ánimo, se resolvió y llamó con los nudillos en los desgastados paneles de roble. El corazón le dio un vuelco cuando una vocecilla aguda y rasposa le invitó a entrar.

"Hermano Benjamín, he de hacerle saber que estoy gravemente contrariado."

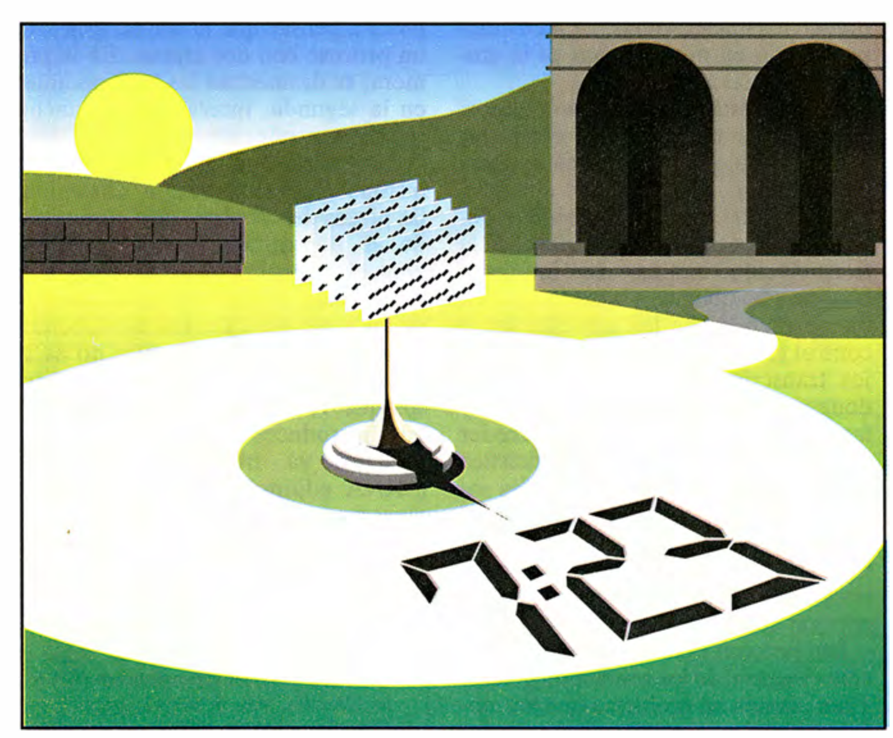
"Revendo padre abad, si he cometido algún error, yo..."

"Pues no, hermano Benjamín. Busco tan sólo su excelente opinión y consejo sobre un asunto que me tiene harto molesto. He oído que tiene usted considerables conocimientos sobre mecanismos."

Benjamín deseaba en lo más hondo de sus pensamientos que el abad no volviera a pedirle que le arreglase otra vez su facistol portátil. El abad tenía un "gancho" muy particular para comprar y averiar cachivaches de alta tecnología. Las oraciones del monje tuvieron respuesta.

"Hermano, tal vez recuerde que el monasterio ha reemplazado hace poco las persianas venecianas. Y estoy perplejo. Con las persianas viejas, yo podía graduar las láminas a media mañana para que la luz entrase sólo a medias, justo lo preciso para leer, después de lo cual ya no era preciso ningún otro ajuste hasta la caída de la tarde. Pero ahora, si quiero mantener la iluminación constante, tengo que estar a vueltas con las persianas cada hora más o menos. ¿A qué es debido esto?"

Benjamín cruzó la estancia y se dirigió a la ventana. Las láminas de las persianas nuevas, observó, eran verticales, mientras que en las antiguas eran horizontales. El abad se las había comprado a un representante que hizo mucho hincapié en que a las láminas verticales se adhería muy poco el polvo. Benjamín estuvo trasteando con los cordones de ajuste del ángulo de las tiras, haciéndolas girar a un lado y al otro. La sala quedó sumida en oscuridad casi completa; después,



1. RELOJ DE SOL DIGITAL que se yergue en el claustro del Monasterio Cartesiano, hogar del hermano Benjamín y de los monjes euclídeos.

un rayo de luz iluminó la pared de enfrente, y luego la sala volvió a oscurecerse.

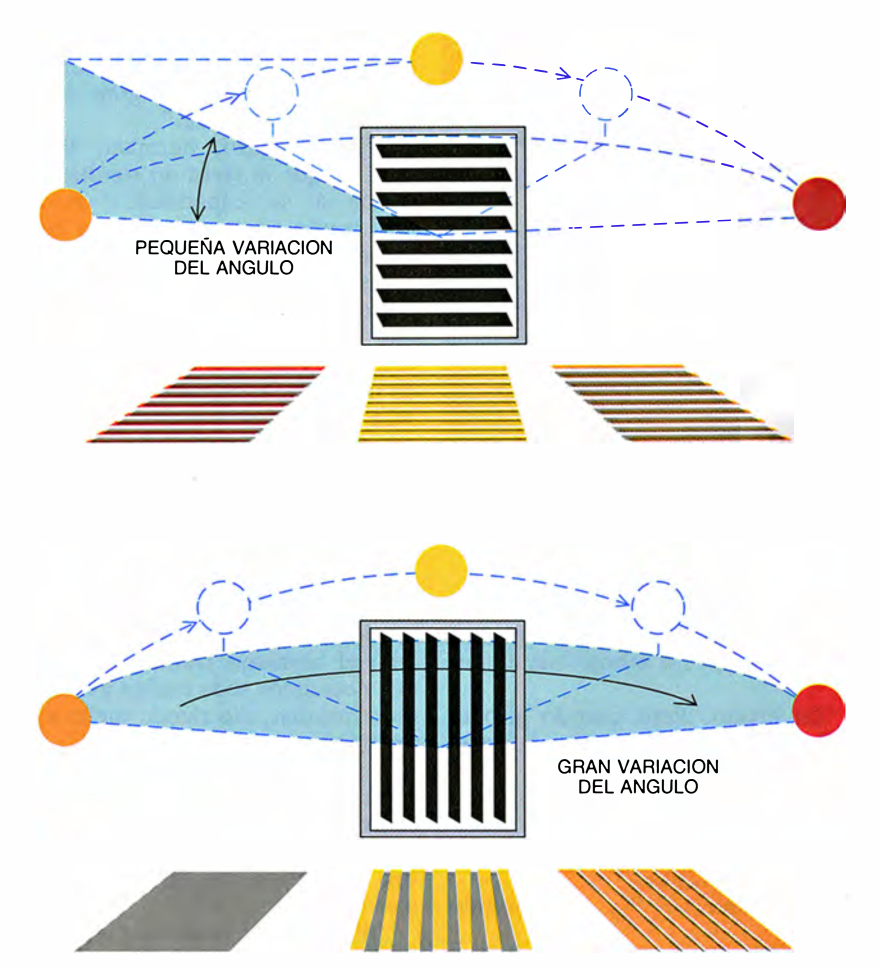
Se hizo (metafóricamente) la luz en su mente. Mas, para explicarlo, ¿qué palabras usar sin ofensa para el abad? "Yo creo, reverendo padre, que ello es consecuencia de la verticalidad de las láminas."

"Bobadas. Las láminas son láminas. Al girarlas de una forma impiden que pase la luz; girándolas de esta otra, la dejan entrar."

"Nada es más cierto, reverendo abad. Sin embargo, el sol es una fuente luminosa móvil, y eso tiene un efecto profundo sobre... cómo decir... sobre la geometría." La palabra estaba bien elegida; como todo buen euclidiano, el abad siempre aprobaba su uso. "Las láminas son planos paralelos muy juntos. Cuando la fuente luminosa está alineada con esos planos, esto es, cuando los rayos de luz que emite son paralelos a ellos, casi toda la luz que incide en la persiana es admitida al interior. Si las láminas son infinitamente delgadas, casi toda la luz puede penetrar... la proporción de luz bloqueada es infinitamente pequeña." El abad afirmó con el gesto, permitiendo que un perceptible grado de impaciencia le nublase el ceño, y el hermano Benjamín se apresuró a explicar: "Si la luz incidente forma ángulo con las láminas, gran parte de ella será bloqueada; cuanto mayor sea el ángulo que forman los rayos y las láminas, menos luz admitirá la persiana."

"Hermano Benjamín, su explicación es tan admirable como concisa, pero seguimos sin ver en qué aclara las diferencias entre persianas verticales y horizontales."

"Reverendo abad, si se desea mantener la iluminación a nivel constante, el ángulo entre los rayos de luz y las láminas debe variar lo menos posible. En nuestro caso, la fuente de luz es el Sol, que avanza por el cielo con el correr del día. Empero, como el monasterio se encuentra en una latitud septentrional bastante alta, la variación angular de la altitud del Sol sobre el horizonte es considerablemente menor que su movimiento de este a oeste. Por tanto, resulta posible graduar una persiana horizontal en una posición intermedia, que deje la habitación un poco oscura a primera hora de la mañana y a la caída de la tarde, y un poco brillante a mediodía, pero resulte aceptable durante toda la jornada. Por otra parte, las persianas verticales han de ser ajustadas cada pocas horas, para seguir el movimiento del Sol."



2. LAS PERSIANAS HORIZONTALES precisan menos ajuste que las verticales porque el ángulo de altitud del Sol cambia menos que el ángulo acimutal.

El abad asintió, pero también frunció el ceño. Había sido *él* quien encargó las persianas.

"Si me está permitida una observación personal", se apresuró a añadir Benjamín, "estimo que se trata de un precio pequeño a cambio de la notable ausencia de polvo en las persianas. Y los ajustes, por su mayor frecuencia, contribuyen en realidad a desalojar las pocas partículas que pudieran ser atraídas por la electricidad estática."

"Sabias palabras, hermano Benjamín. Puede usted encargarse de la lectura en los maitines de mañana. Y dado que tan despejado parece estar su caletre estos días, tal vez pueda ofrecernos su consejo sobre otro asunto de más grave importancia. Se trata del reloj de sol del monasterio." Aquel herrumbroso artilugio, que contaba ya unos cinco siglos, se había venido al suelo hacía cosa de una semana, al posarse en él una bandada de palomas.

"Yo podría construir uno que lo sustituyera, reverendo padre", se ofreció Benjamín con la mejor disposición. "El diseño se basa en los mismos principios geométricos del movimiento del Sol en combinación con el de la Tierra."

"Humm... Me parece que no", dijo el abad. Se subió la manga de su hábito para revelar un costoso reloj de oro. "Más bien estoy pensando en algo similar a esto."

"Podríamos decorar el ábaco del reloj con una hoja de oro."

"No, no me refería a la ornamentación. Fíjese en la esfera."

"¡Ah! Es un reloj digital."

"Exactamente. Tengo la impresión de que nuestro monasterio matemático iría más acorde con los tiempos si estuviera equipado con un reloj de sol digital."

"Reverendo abad, no habría dificultad en grabar en la tabla del reloj esos números angulosos que tanto parecen agradar a los diseñadores de relojes digitales."

"No, hermano Benjamín, no capta usted mi onda. Permítame que se lo haga ver con este anillo. Vea, cuando lo sostengo ante la luz proyecta una sombra sobre la mesa."



3. TRES SOMBRAS DIFERENTES arrojadas por un mismo objeto.

"Así es, reverendo."

"Y, ¿qué forma tiene esa sombra?"

"Un círculo. Lo mismo que el anillo."

"En efecto. Pero cuando giro el anillo, poniéndolo de canto hacia el sol, ¿qué pasa?"

"Queda una línea de sombra recta."

"¡Exactamente! ¿Y no le recuerdan nada estas dos cosas?"

"A los números 0 y 1, reverendo padre."

"¡Excelente! Sí, el anillo arroja una sombra que, cuando es iluminado en cierto ángulo, se parece al dígito 0; en cambio, cuando la luz incide desde otro, se parece a un 1. En lo que estoy pensando es en un objeto cuya sombra cambie con el movimiento del Sol y en cada momento se parezca a la hora apropiada, expresada con dígitos."

"¿Quiere usted decir que a las 7 y 23 minutos la sombra habría de tener el aspecto de 7:23?"

"Sí. Y la sombra debería corresponder con la hora en cada momento del día, mientras dure la luz solar."

"Es un problema de gran dificultad, reverendo padre."

"Estoy seguro, hermano Benjamín, de que la tarea no resultará superior a su capacidad... al menos, confío en que no. Ahora he de atender a asuntos más urgentes. Puede usted irse."

Aquella noche, el hermano Benjamín tuvo una visión: un sistema de placas de vidrio esmerilado que salían de una caja, arrojaban una sombra e iban de esta forma mostrando la hora del día. Pero al oír la idea, el abad la rechazó de plano, rezongando que los dispositivos digitales carecían de piezas móviles.

El hermano Benjamín estaba acurrucado en un rincón del claustro euclidiano, seca y agotada la fuente de sus ideas, cuando se aposentó a su lado el hermano Daniel. Benjamín, que necesitaba toda cuanta ayuda pudiese recabar, dio rienda suelta a sus pesares.

"... así que ha de arrojar diferentes sombras, ¿eh? Espera... eso me recuerda una cosa... Vuelvo en un segundo." Daniel reapareció con un libro. Benjamín alcanzó fugazmente a leer el título.

"¡Pero Daniel, este libro está en el Indice de Matemáticos Nefandos! Es un libro proscrito. No lo puedo leer. ¿De dónde lo has...?"

"De la biblioteca particular del abad. El viejo inútil se guarda para sí todo lo que resulte un poco estimulante."

"Podrías meterme en un lío verdaderamente serio con esto", murmuró Benjamín. Daniel le pasó el ejemplar de *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid*. Benjamín examinó someramente unas cuantas páginas de acá y allá, sin encontrar nada salaz. "¿Por qué está prohibido?"

"Dicen que la relación entre Aquiles y la tortuga es un tanto... indecorosa."

"¡Oh! ¿Y lo es?"

"No lo sé. No he llegado tan adelante. Pero déjame que te muestre qué estaba pensando. Fíjate en la portada."

La portada exhibía un objeto de madera tallado de forma harto curiosa. Su sombra, a la izquierda, tenía la forma de una letra G. Abajo era una B, y a la derecha una E. "Se me ocurrió que podría darte una pista", dijo el hermano Daniel. "Al menos, muestra la forma de obtener tres sombras completamente diferentes a partir de un mismo objeto. Tal vez tengamos aquí un principio general."

"Sabes, hermano, puede que tengas algo de razón. He estado fijándome demasiado en cuestiones de detalle, como la de conseguir que las cifras tuvieran la forma correcta. Lo que tendría que haber hecho es estudiar un problema más general, a saber, ¿qué relación existe entre las sombras que puede arrojar un objeto en direcciones diferentes?"

"¿Y conoces la solución?"

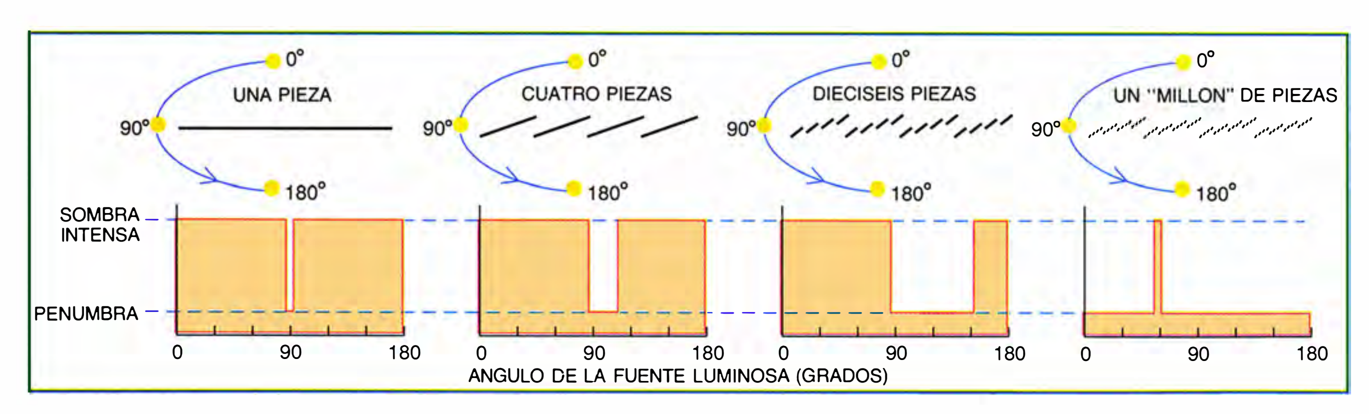
"Me parece que sí", dijo Benjamín, dando vueltas al libro entre las manos. "Esta fotografía lo deja muy claro."

"Así pues, ¿qué relación existe entre las sombras que puede arrojar un objeto iluminado desde diferentes direcciones?", quiso saber Daniel.

"No hay sólo una", replicó Benjamín. Y sin pararse en explicaciones acometió el desarrollo de su idea.

Al cabo de semanas de trabajo ininterrumpido en el taller, el monje quedó satisfecho. Llevó el artefacto concluido a las dependencias del abad para hacerle una demostración.

"Reverendo padre, el modelo a es-



4. PRINCIPIO DE LA PERSIANA VENECIANA: una lámina puede ser descompuesta en piezas más y más pequeñas de modo que arroje sólo sombra en una dirección. Los gráficos muestran las sombras que proyectan las láminas al moverse en torno a ellas una fuente luminosa.

cala ya está concluido", dijo ufano el hermano Benjamín. "Si recibe su aprobación encargaré para el patio la construcción de una versión a escala natural." El abad bajó la mirada hacia el escritorio, donde era visible una sombra no muy intensa, pero sí claramente distinguible, que mostraba 1:52. El abad consultó su reloj, que marcaba 4:17.

"Le pido indulgencia, padre abad", replicó Benjamín cuando le fue señalada la discrepancia. "Es sólo un ajuste de poca monta." Estuvo trasteando con el reloj de sol hasta que también señaló 4:17. El abad colocó su reloj sobre el escritorio, al lado del otro. Cuando el reloj de pulsera saltó a las 4:18, la sombra se tornó un poco borrosa, pero un instante después también dejaba leer 4:18. El reloj solar mantuvo la sincronía con los dígitos del reloj electrónico durante varios minutos.

"Ingenioso", murmuró el abad. "Tal vez nuestro hermano guste explicar su funcionamiento."

"Padre, comencé a comprender la naturaleza de un tal dispositivo al plantearme una pregunta muy general. ¿Qué relación existe entre las sombras que arroja un objeto en diferentes direcciones? En el caso de los objetos corrientes de la vida cotidiana, cuya estructura es relativamente simple —esto es, compuesta por planos o superficies lisas—, la respuesta es que la sombra ha de variar de forma continua. Consiguientemente, pequeños cambios en el ángulo de iluminación han de producir pequeños cambios en la sombra.

"Mi formación de monje de la orden euclídea me ha dejado, empero, bien versado en todas las facetas de la geometría. Como usted sabe, mi especialidad son los fractales. Ahora bien, los fractales poseen estructura fina a todas las escalas de ampliación. Se me ocurrió que, si de alguna forma pudiera 'amplificar' esa estructura fina, podría crear un fractal cuya sombra variase discontinuamente. Concebí la idea de que, dada una lista de sombras, por arbitraria que fuese, tendría que existir un cuerpo que, iluminado desde una serie de direcciones fijas, exhibiera dichas sombras. En un sentido muy fuerte, las sombras arrojadas por un fractal idóneo pueden cambiar de figura y tamaño de maneras completamente arbitrarias.

"Quedaba por establecer la veracidad de tal idea. Descubrí que en esencia lo era; en 1986, Kenneth Falconer, de la Universidad de Bristol, en Inglaterra, había demostrado ya un teorema a tal efecto. Sin embargo, para que la demostración funcione puede que haya que modificar las sombras por adición o sustracción de un conjunto muy pequeño de puntos. Dado que tales conjuntos son virtualmente invisibles para el ojo humano, tales modificaciones no alteran el funcionamiento del reloj de sol. Lo más notable se esconde en la idea subyacente, el principio de la persiana veneciana, que se utiliza de forma iterativa para obtener un conjunto cuya sombra es grande en ciertas direcciones e infinitesimalmente pequeña en otras. Ensamblando entre sí muchos de tales conjuntos seguido de un proceso de paso al límite, podemos demostrar que el teorema es correcto. En nuestros talleres me fue posible poner en práctica el procedimiento con el detalle suficiente como para producir el reloj de sol digital que ahora descansa sobre su escritorio."

El abad, contra sus deseos, estaba impresionado. "Hermano Benjamín, su reloj de sol es un prodigio. Su recompensa, desde luego, se hallará en el cielo, por ser más espiritualmente elevada que cualquier remuneración terrena." Se le ocurrió de súbito un pensamiento. "¿Cabría en lo posible que estuviera usted dispuesto a asistirnos en otra tarea?"

El monje no tuvo más remedio que aceptar.

"He oído decir que en el Tíbet utilizan máquinas en las que una plegaria escrita es arrollada sobre una rueda. Cuando se hace girar la rueda, la oración da vueltas solidariamente; se dice entonces que ha sido 'leída'. Se trata, desde luego, de una innovación muy eficiente, y estoy convencido de que hay mucho que decir en su favor. Por otra parte, en cuanto euclídeo devoto, se percatará usted de que únicamente tienen significado las oraciones habladas. Me pregunto si sería posible utilizar principios similares a los subyacentes a su reloj de sol digital para crear una máquina que, al girar movida por el viento, emitiese los sonidos apropiados."

"Por el amor del cielo", pensó Benjamín. "A ver cómo me las voy a apañar para construir un sintetizador de oraciones basado en energías alternativas."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FRACTAL GEOMETRY-MATHEMATICAL FOUNDATIONS AND APPLICATIONS. Kenneth Falconer. John Wiley and Sons; N.Y., 1990.

Libros

Echegaray, los sistemas biológicos, desertización y principio de la vida

Albert Dou, Antonio Prevosti, Joaquín del Val y Luis Alonso

JOSÉ ECHEGARAY. Edición e introducción de José Manuel Sánchez Ron. Biblioteca de la Ciencia Española; Madrid, 1990.

Según indica ya la colección en la que está incluido, este libro se dedica a Echegaray como matemático y físico-matemático. En cuanto tal, el polifacético Echegaray no tiene tanta relevancia como la que tiene como escritor, actividad en la que se hizo acreedor del premio Nobel de literatura. Con todo, su vida científica desempeña un papel extraordinario en el desarrollo de la ciencia en España, más importante que el que desempeñó su vida pública en la política nacional, que tampoco fue intranscendente.

El grueso del libro lo constituye la reproducción en facsímil de diez *Documentos* o escritos del propio Echegaray, cuidadosamente seleccionados por el editor. Van precedidos de una *Introducción* debida a Sánchez Ron, quien, después de dar una idea general y una biografía, pasa a estudiar y valorar con competencia la aportación científica del famoso físico-matemático madrileño. El *Apéndice* (Documento 11) contiene la conferencia pronunciada por Francisco Vera en el Ateneo de Madrid en 1935 sobre *Los historiadores de la matemática española*.

Los diez *Documentos* seleccionados por el editor dan ya suficientemente una imagen sugestiva y muy interesante del biografiado en cuanto físico-matemático. He aquí unos brevísimos comentarios.

Por su más alto nivel científico sobresalen las *Lecciones* dadas en el Ateneo de Madrid sobre *Resolución de ecuaciones y teoría de Galois* (Doc. 4, 1897) y las *Conferencias* del *Curso de Física Matemática* que impartió durante diez cursos, desde 1904-05 hasta 1914-15, en la Universidad Central de Madrid. En el otro extremo están los trabajos más cercanos a la divulgación científica, de los que son muestra *La serie de negaciones* (Doc. 6, 1915) y *Los rayos catódicos* y *El espacio de muchas dimensiones* (Doc. 7, 1905), publicados respectivamente en la revista *Madrid Científico* y en el libro *Ciencia popular*. En un nivel intermedio están los artículos publicados en la *Revista de Obras Públicas*. Por cierto que el primer volumen de esta revista contiene el primer artículo científico de Echegaray, *Del movimiento continuo* (Doc. 1, 1953), escrito a los 20 años, siendo alumno de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en el último año de su carrera. Otras dos muestras de los numerosos artículos publicados en la *Revista de Obras Públicas* son *Sobre la imposibilidad de la cuadratura del círculo* (Doc. 3, 1866) y *Electricidad y magnetismo, Resultados experimentales y teorías diversas* (Doc. 8, 1867).

Finalmente, los dos documentos restantes son de corte distinto. Se trata de dos discursos. El primero, sobre la *Historia de las matemáticas puras en nuestra España* (Doc. 2, 1866), fue pronunciado en el acto de su recepción en la Real Academia de Ciencias de Madrid, discurso que fue famoso por la polémica que suscitó. El segundo discurso, *La ciencia y la crítica* (Doc. 5, 1905), fue la lección inaugural del curso 1905-06 en la Universidad Central, cuya celebración por sí sola constituía ya un homenaje al orador, y que fue pronunciada antes de que el autor hubiese empezado sus clases en la universidad.

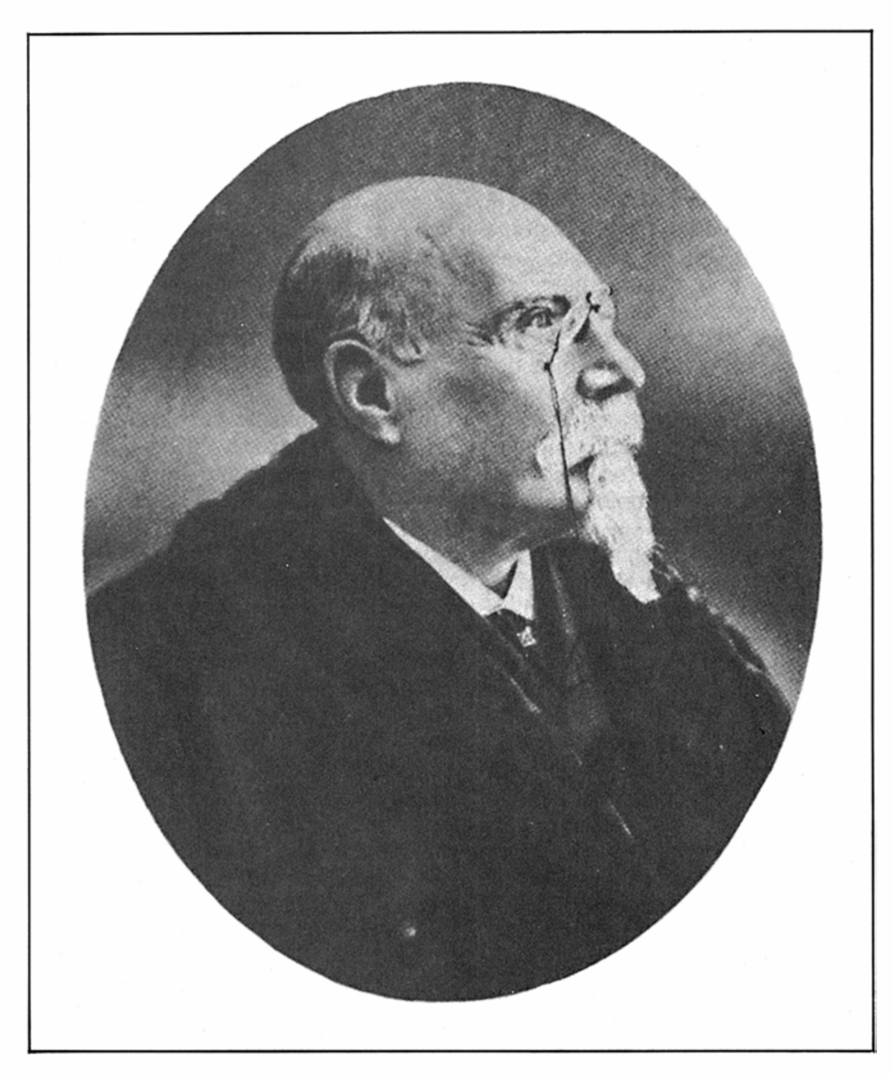
Al leer estos documentos, Echegaray aparece, además de dotado de una enorme categoría humana, como motivado por una inmensa pasión por las matemáticas puras, y en menor grado también por las disciplinas más estrechamente relacionadas con las mismas, a saber, la física teórica (especialmente la mecánica) y su fundamentación filosófica. No en vano cursó la carrera de ingeniero de caminos.

Entre los documentos aducidos sobresale por su profundidad matemática la exposición de la teoría de Galois (Doc. 4). No desmerecen las conferencias del curso de física matemática (Docs. 9 y 10). La conferencia del documento 10, que versa sobre *La teoría de los torbellinos*, concluye brillantemente con la demostración del teorema de invariancia de la circulación del fluido. A nivel de investigación, como bien indica y pondera el editor (p. 14), no hay ninguna aportación original. Sí hay una asimilación y una forma de exposición muy personal, rica en su expresión al estilo de la época, brillante y clara. A través de estas páginas, su autor aparece como un magnífico profesor, que ha aprendido las teorías que explica estudiándolas en los escritos originales de los grandes matemáticos y físicos franceses, alemanes y con menor frecuencia ingleses. Este excelente magisterio hizo exclamar a Rey Pastor: "Para la matemática española, el siglo XIX comienza en 1865, y comienza con Echegaray".

Los escritos de los documentos publicados en la *Revista de Obras Públicas* y los publicados en la revista *Madrid Científico* y en el volumen *Ciencia popular* (documentos 1, 3, 8, 6 y 7) son una buena muestra del gran número de artículos científicos publicados por Echegaray en muy diversas publicaciones periódicas "como *España, El Imparcial, Revista Hispano-Americana, El Liberal, Diario de la Marina* de La Habana, *Ilustración Artística*, por citar sólo algunas" (p. 85). Llama la atención "la gran cantidad y variedad de conocimientos científicos y tecnológicos de Echegaray, así como su habilidad para presentarlos a un público general" (p. 86).

La lección inaugural del curso 1905-06, *La ciencia y la crítica* (Doc. 5), resulta muy interesante. Son juicios de un hombre maduro, extraordinariamente inteligente y competente, pero que a pesar de ello se encuentra perplejo. Conoce bien la mecánica clásica, pero está siendo superada y se debate frente a la emergencia de una nueva física. A pesar de su brillantez y profundidad —máximas en estos temas en la España de entonces—, el discurso deja un sabor de quiero y no puedo. Véase el bien ponderado juicio del editor (pp. 98-100). En *La serie de negaciones,* sobre los mismos temas, llega a dudar de la legitimidad de la aplicación de las ecuaciones diferenciales, como consecuencia de la discontinuidad de ciertas magnitudes físicas; y parece aceptar la superación de la cinemática clásica como consecuencia de la obra de Einstein.

En cuanto al discurso de recepción en la Academia de Ciencias, *La historia de las matemáticas puras en nuestra España*, resulta necesaria-



1. José Echegaray Eizaguirre (1832-1916).

mente muy esquemático, un tanto político y demasiado negativo. Hay que agradecer al editor la inserción del discurso de Francisco Vera *Los historiadores de la matemática española*. Para un juicio fundamentado y bien elaborado (en ocasiones demasiado duro) del discurso de Echegaray me remito al discurso de Vera, pues éste le dedica siete páginas (pp. 458-465); y también al comentario bien ponderado y documentado de Sánchez Ron (pp. 44-49). Vera, en su discurso, dedica también un largo comentario a Rey Pastor (pp. 472-475); su juicio es demasiado duro, como él mismo reconoció, después de haberle conocido más de cerca en Buenos Aires, en el sincero y brillante elogio que hizo del celebérrimo matemático riojano con ocasión de su muerte.

Después de la lectura del libro que reseñamos, Echegaray aparece, en efecto, como "figura intermedia" (p. 14). La influencia de su magisterio oral y escrito, de su deseo de promover "el estudio y la afición al estudio de las altas cuestiones" (p. 103) de la física matemática tiene que haber sido inmensa.

Con frecuencia, sus reflexiones, que parecen escritas a vuela pluma, me han llamado la atención. Por ejemplo, escribe: "La experimentación debe ser siempre *imparcial*, si se nos permite esta manera de expresarnos, pero no debe ser irreflexiva: una *idea* debe guiarla, y esta idea es, en la física moderna, la de unidad y armonía entre todas las partes de la ciencia" (p. 378). Aquí se enuncia la relación de círculo casi vicioso o de reciprocidad entre paradigma y experimentación.

Respecto de la presentación del libro hay que decir que el editor y autor de la *Introducción* lo ha enriquecido con numerosas notas interesantes, una larga lista de referencias bibliográficas y una bibliografía científica de Echegaray. Quizá se echen de menos un índice de nombres propios y la paginación de los *Documentos* en el facsímil.

Sánchez Ron con la publicación de este texto ha prestado un excelente servicio a la comunidad de historiadores de la ciencia. (A. D.)

BIOLOGICAL SYSTEMS, por Barbara R. Jasny y Daniel E. Koshland, Jr. (eds.). American Association for the Advancement of Science; Washington, 1990.

May, autor del último de los 20 artículos publicados en la revista *Science* en 1988 y 1989 recopilados en este libro, dice que el número de especies biológicas actuales y bautizadas con un nombre latino es del orden de 1.500.000. Añade, además, que las estimas sobre el número de las existentes oscilan entre 5.000.000 y 50.000.000. Algunas características de este enorme número de sistemas biológicos son comunes a todos, porque son fundamentales de la vida o una consecuencia de que cuanto vive tiene un origen único. No obstante, junto a esta unidad fundamental se observa una gran variabilidad en el grado de complejidad, en el modo de organización, en las propiedades estructurales, morfológicas y funcionales, etc., que pone de manifiesto la extraordinaria gama de posibilidades que tiene la organización de estos sistemas.

Dado el gran número de especies, no es posible estudiarlas todas; por otra parte, no sería eficaz, para el progreso de los conocimientos biológicos, una elección aleatoria y caprichosa de los organismos utilizados en la investigación. Lo racional es concentrar el trabajo en el estudio de algunos sistemas biológicos, elegidos como modelos representativos de la inmensa diversidad de la vida. Por ello, en la investigación biológica surge un problema que no se plantea, por lo menos con la importancia que allí reviste, en otras ciencias: la elección del material adecuado para llevar a cabo una investigación concreta.

Los editores exponen en el prefacio y en un pequeño artículo introductorio, titulado "Sistemas biológicos: la elección es nuestra", su propósito al reunir estos artículos en un libro: informar y orientar a los estudiantes, investigadores jóvenes y, en general, a cualquier persona que desee entrar en un nuevo campo de investigación biológica, sobre la elección correcta de su material de trabajo.

Los motivos en los que se basa la elección de material de trabajo son diversos y deben valorarse buscando un equilibrio entre ellos. En primer lugar, es evidente que muchos procesos y funciones son exclusivos de determinados grupos. Además, para estudiar las características más generales de la vida, no todos los sistemas biológicos son igualmente adecuados.

Las características básicas suelen estudiarse mejor en los sistemas de organización sencilla, en los que es más fácil utilizar el método analítico. Los resultados obtenidos con la elección de los virus y las bacterias, para investigar los procesos fundamentales de la genética molecular, han demostrado la validez de este criterio. Vermus en el primer artículo recopilado y Magassanik en el segundo, que tratan de los retrovirus y de las bacterias respectivamente, así lo señalan. Una ventaja semejante tiene la elección de las levaduras (Botsein y Fink) para investigar los aspectos básicos de la genética molecular propios de los eucariontes, la de *Dictyostelium discoideum* (P. Devreotes) para analizar la morfogénesis, y también la de *Caenorhabditis elegans* (Kennon) para estudiar algunos procesos esenciales del desarrollo animal.

El condicionamiento en la elección del material de trabajo, por la especificidad del proceso que interesa estudiar, es la razón de que, para investigar los aspectos más complejos del comportamiento animal, se utilicen los vertebrados superiores.

Otro aspecto que se considera al elegir los temas y el material de trabajo en la investigación biológica es el interés que los resultados obtenidos puedan encerrar para el hombre. Salen al paso las limitaciones para experimentar en el propio hombre y, por tanto, la necesidad de suplir esta deficiencia recurriendo a sistemas que se le aproximen. En la elección de mamíferos y primates para los estudios de comportamiento ha influido este criterio. Un caso semejante es la utilización de la rata, para estudiar trasplantes de órganos y tejidos, los riesgos de sustancias cancerígenas y las enfermedades cardiovasculares. En la misma línea, King *et al.*, al tratar de los primates, señalan su importancia para conocer el envejecimiento, la reproducción, la aterosclerosis, las enfermedades infecciosas, el cáncer y para ensayar vacunas. También en este sentido, la utilización de vertebrados para estudiar el desarrollo puede en algunos aspectos ser más conveniente que el empleo de organismos que ofrecen otras ventajas, como *Caenorhabditis elegans* y *Drosophila melanogaster*. Pero la limitación de la experimentación en humanos no es ya absoluta; a través de cultivos celulares y de tejidos se obtiene información interesante en el campo de la genética humana, sobre todo utilizando las técnicas de la ingeniería genética.

También nos interesa conocer los sistemas biológicos que nos perjudican, para combatirlos con eficacia. Así, los retrovirus, además del valor que tienen para los estudios de biología básica, nos revelan sus relaciones con el cáncer; el agente del SIDA es un retrovirus.

Para desarrollar un programa de investigación, importa conocer bien el estado de la cuestión en el sistema biológico con el que se trabaja. Contrariamente a lo que puede parecer a algunos no iniciados en la investigación científica, los sistemas en los que más se ha trabajado y los mejor dominados resultan ser también los más adecuados para seguir profundizando en temas de interés. La utilización de *Escherichia coli* y de *Drosophila melanogaster* son dos ejemplos paradigmáticos en este sentido. Así lo señalan Magassanik en el capítulo que trata de las bacterias y Rubin en el 9, donde informa sobre cómo se utiliza *D. melanogaster* en la investigación biológica actual. La posición preeminente de esta especie en los estudios de biología del desarrollo se debe al profundo conocimiento que poseemos de su genética y a la gran cantidad de cepas de laboratorio, con características muy diversas, entre las que se puede elegir. A veces, no se aprecia correctamente la utilidad de elegir sistemas con estas características, porque se confunde el objetivo; no se trata de conocer mejor, por ejemplo, *E. coli* o *D. melanogaster*, sino de utilizar sistemas adecuados para progresar en el conocimiento de cuestiones básicas, de interés general para toda la biología. Para avanzar es preciso construir sobre una base sólida y manejar los mejores instrumentos de que se dispone. Para conseguir los resultados que se logran en estos organismos, en otras especies serían necesarios años de trabajo previo. Por otra parte, el caso de *E. coli* demuestra que un organismo con quien estamos familiarizados, además de servir para progresar en los conocimientos básicos, permite avanzar en las aplicaciones técnicas. Esta bacteria constituye hoy el principal instrumento de la ingeniería genética.

Después de destacar las ventajas que encierra optar por un sistema bien conocido, se impone agregar de inmediato que este criterio no puede ser de aplicación universal. Ningún organismo posibilita el estudio de todos los aspectos de la biología, sin olvidar la existencia de variabilidad en los procesos biológicos. Cuando se trata de abrir un campo de trabajo puede ser conveniente, e incluso necesario, encontrar un material también nuevo y especialmente idóneo. Tal es el origen, relativamente reciente, del uso de *Caenorhabditis elegans*, escogido por Brenner como organismo pluricelular dotado de suficiente sencillez para poderlo analizar con la facilidad y resolución características de la investigación en microorganismos. (*Arabidopsis* es fanerógama que se está convirtiendo en modelo de sistema para estudiar la biología molecular de las plantas superiores.) Recuérdese que la elección de *Drosophila melanogaster* fue también resultado de una decisión meditada y, por cierto, muy afortunada, por Morgan, para la investigación en genética, en una época en la que esta disciplina estaba en sus inicios. La historia de la biología nos ofrece varios ejemplos en los que la elección de un nuevo sistema como modelo ha abierto nuevos horizontes en la investigación. El acierto ha sido, pues, fruto de una visión amplia y profunda al mismo tiempo, adquirida con la práctica de la investigación, acompañada de preparación y capacidad para explotar el nuevo sistema adecuadamente y obtener con él resultados relevantes. La consideración de estos casos no contradice la motivación que ha llevado a Jasny y Koshland a presentar recopilados los artículos reunidos en *Biological Systems*, ya que el libro está principalmente dirigido a los primerizos en esas tareas.

Por último, la elección del material de trabajo en la investigación biológica interesa hacerla también con otro criterio. Conviene utilizar organismos de manejo fácil y económico. En general, los modelos que sobresalen por su extenso uso y por la importancia de los resultados conseguidos, suelen tener estas características.

El conjunto de artículos recopilados en *Biological Systems*, guía provechosa en la elección de material de trabajo, nos ofrece una panorámica del estado actual de la investigación biológica. (A. P.)

STRATEGIES TO COMBAT DESERTIFICATION IN MEDITERRANEAN EUROPE, por J. L. Rubio y R. J. Rickson (editores). Commission of the European Communities; Luxemburgo, 1990.

Este libro recoge las 19 intervenciones de un seminario que, sobre la desertización en la Europa mediterránea, tuvo lugar en Valencia en 1987, organizado por entidades comunitarias y nacionales. No se trata, por tanto, de un texto con una unidad de estilo, científica o pedagógica.

¿Qué es, realmente, la desertización? El término, ambiguo y que ha dado lugar a equívocos y a numerosas matizaciones, se popularizó a partir de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desertización, celebrada en Nairobi en 1977. Allí se la de-

finió como "un proceso de degradación ecológica por el cual la tierra productiva pierde la totalidad o parte de su potencial de producción". Se apuntó que entre los procesos que podían deteriorar o degradar los componentes tierra, agua y vegetación figuraban, entre otros, la salinización y alcalinización de suelos, la erosión, la toxicidad de elementos incorporados al suelo, su degradación física con pérdida de estructura, así como su degradación biológica. Estos procesos, se concluía, podrían dar lugar a situaciones de tipo desértico.

De entonces acá se han celebrado encuentros, conferencias y seminarios de carácter internacional sobre el tema general o alguno de sus aspectos: en 1978, se celebró en la Universidad de Gante un simposio sobre evaluación de la erosión en Europa y Estados Unidos; el de Mytilene, de 1984, estuvo consagrado a la información sobre climatología en el programa de la CEE; en 1985, el de Cesena versó sobre degradación de tierras e impacto de los cambios en su uso y gestión; la Universidad Politécnica de Madrid desarrolló en 1987 otro sobre la desertización; en Lisboa, la Sociedad Europea para la Conservación del Suelo celebró en 1990 uno con el título "Interacción entre sistemas agrícolas y conservación del suelo en el ámbito mediterráneo".

El libro se presenta agrupado en tres grandes secciones. En la primera, "Perspectivas históricas y características del medio ambiente mediterráneo en relación a la desertización", M. Dupré analiza los cambios desencadenados por el hombre a lo largo de la ocupación histórica del Mediterráneo, comparados con el registro de las variaciones climáticas y morfológicas, y llega a la conclusión de que resulta muy difícil separar las causas humanas de las naturales en un medio de tan prolongado asentamiento humano. C. Roquero expone los principales tipos de suelo en relación con su susceptibilidad a la erosión. D. Gabriels apunta el interés de la utilización de un índice de erosividad por lluvia para las áreas de distribución estacional de precipitación: el índice de concentración de precipitación propuesto por J. E. Oliver en 1980. Pedro Montserrat asocia el pastoralismo, desintegrado a menudo del medio, a un sistema de explotación, dentro de los sistemas naturales, que podría favorecer la conservación del suelo. Acaba esta sección con el debate sobre la falta de pruebas de que el fuego sea un agente de desertización. Para unos sería sólo de "perturbación" (L. Trabaud).

La segunda sección, "Diagnóstico de la situación actual de la desertización", agrupa seis trabajos. G. Chisci se ocupa de la erosión del suelo en cuanto factor de desertización en el ámbito mediterráneo. H. J. Yassoglou analiza las condiciones naturales y factores antrópicos causantes de la desertización en Grecia. De forma similar, J. L. Rubio y P. Sanroque revisan la situación en España, con especial incidencia en el área valenciana. J. Albadalejo presenta la situación en la región murciana, insistiendo especialmente en la evolución de los parámetros del suelo. A partir de los resultados de las pruebas realizadas con un simulador portátil de lluvia, E. Barahona, J. Quirantes, J. L. Guardiola y A. Iriarte destacan el papel que le corresponde al carbonato cálcico en las fracciones finas del suelo, así como la salinidad, en la susceptibilidad a la erosión en suelos del sureste español. Por último, J. B. Thornes, C. F. Francis, F. López Bermúdez y A. Romero Díaz exponen los problemas del estudio del flujo de escorrentía en áreas de alta pedregosidad y los resultados obtenidos en una parcela experimental en Murcia.

"Iniciativas, estudios y medidas de control de los diferentes procesos implicados" se titula la postrera sección. A. Giordano explica el plan para la evaluación cartográfica del riesgo de erosión dentro del proyecto CORINE de la CEE. Abunda en ello R. P. C. Morgan con el examen del modelo de erosión. R. J. Rickson expone las características de un catálogo de investigadores, organismos y proyectos en relación con la erosión y conservación del suelo en la CEE. J. Sánchez se centra en las aproximaciones cartográficas al problema de la erosión para escalas medianas (entre 1:25.000 y 1:50.000). J. L. Rubio y F. Pomares explican la estructura y objetos de una unidad de investigación en desertización. Le Houéran examina las causas de la degradación de las tierras en la Europa mediterránea, tanto las naturales como las inducidas por el hombre, así como los diferentes usos del territorio, proponiendo finalmente unas líneas de actuación futura para su gestión ecológica. H. E. Dregne recoge la situación sobre los sistemas de estudio y control de la erosión en Estados Unidos. Por último, J. A. Carrera presenta la situación y trabajos realizados dentro del proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertización en el Mediterráneo).

Resulta indudable el interés de la mayoría de los trabajos presentados, a pesar de no ser muchos de ellos originales —aparecidos ya en otras publicaciones o congresos—, constituyendo una buena recopilación sobre las diferentes perspectivas del estado de la cuestión. Llama, sin embargo, la atención la ausencia de trabajos que hagan referencia a la degradación de recursos hídricos —tanto superficiales como subterráneos—, así como sobre los distintos aspectos climáticos que pueden incidir en la desertización (concentración de CO_2 y contaminantes en la atmósfera, fluctuaciones climáticas, sequía, etc.).

Hubiera sido deseable una unificación lingüística en los trabajos —tres aparecen en español y el resto en inglés—, así como una adecuada maquetación, presentación e impresión del libro, que habría dado como resultado un texto atractivo y de lectura más agradable. (J. V.)

LE PRINCIPE DE VIE CHEZ DESCARTES, por Annie Bitbol-Hespériès. Librairie Philosophique J. Vrin; París, 1990. **CONGETTURA ED ESPERIENZA NELLA FISIOLOGIA DI HALLER**, por Maria Teresa Monti. Leo S. Olschki; Florencia, 1990.

Pártese la historia de la biología en dos corrientes principales, la de inspiración mecanicista, que tiene en Descartes su impulsor, y la de inspiración vitalista, que ve en Haller una de sus figuras prominentes. Pero, como muchos tópicos, éste se había venido transmitiendo sin un examen riguroso previo. Enhorabuena, pues, los trabajos de Bitbol y de Monti, que, a la postre, no niegan el lugar común, sino que lo razonan con pruebas y argumentos inéditos, mal conocidos o entendidos a medias.

Desde Aristóteles, el alma era el principio de vida; el alma vegetativa en las plantas, la sensitiva en los animales y la espiritual en el hombre. Esa visión del mundo orgánico se completaba con otra corriente pampsiquista, minoritaria y pluriforme, que se aglutinaba, ya en el Renacimiento, en torno a Marsilio Ficino y Tomás Campanella. Descartes establece la división absoluta en el hombre entre la *res cogitans* y la *res extensa*, en cuya virtud el alma, creada por Dios, confina su dominio al pensamiento y el cuerpo queda a merced de las leyes de la mecánica, incluidos los principios del movimiento y de la vida. El alma queda así desgajada del concepto de vida. El animal, y no digamos la planta, son mecanismos que no necesitan de nada externo para explicar su comportamiento.

Ese es el punto de partida, y su desarrollo lo articula Bitbol en tres partes: interés de Descartes por los fenómenos de la vida y la cuestión del principio de vida en su obra, noción

del calor cardíaco como principio de vida y la teoría cartesiana del movimiento del corazón, y, por último, la circulación de la sangre y su función nutritiva del calor que da origen a todo movimiento animal.

Descartes expone sus ideas biológicas en la quinta parte del *Discurso del método*, en las *Pasiones del alma* y en ciertos artículos de los *Principios de la filosofía*. Eso por lo que respecta a las obras publicadas en vida. Póstumas fueron el *Tratado del hombre* y *La descripción del cuerpo humano*, por lo que aquí interesa. ¿Qué nivel alcanzaron? Discrepan los autores, desde el aprecio de Etienne Gilson, quien mejor ha estudiado su relación con la biología contemporánea (Harvey), hasta la reticencia de Jean Rostand. Bitbol, aunque disiente en muchos juicios de Gilson, vindica también su valor e independencia, incardinándolo en una corriente anatomista de corte moderno (Caspar Bauhin).

2. Láminas extraídas del Theatrum anatomicum *de Caspar Bauhin. En la X se muestra la glándula pineal y se la señala con la letra* H.

Para crear su propio sistema, que pretendía abarcara todas las ciencias, Descartes lee incansablemente obras de medicina (Vesalio, Fabricio d'Acquapendente, Bauhin y Harvey) y diseca animales. En punto al principio de la vida, entiende que éste debe enmarcarse en la descripción general de la embriología, y nada mejor que comprobarlo en el examen de fetos de ganado en distinto estadio de formación. Pero es una noción que se le resiste, como confiesa en los distintos intentos realizados en 1629, 1630, 1632, 1633, 1637-1638, 1642-1643, 1648. Por axioma, rechaza cualquier explicación que no sea mecanicista (su imagen preferida es la del reloj), con lo que queda orillada cualquier solución que arranque de Platón o de Aristóteles. Su principio de vida es el calor, pero no el innato de la anatomía tradicional, ni las revisiones de los médicos de su tiempo, sino "une espèce de feu que la sang des veines y entretient", fuego "sin luz" que es el principio corporal de movimiento de todos los miembros y se rige por las leyes eternas y únicas de la naturaleza, en claro préstamo de la cosmología de Kepler.

Para aclararnos el sentido exacto del "calor del corazón, principio de vida", se nos introduce en la anatomía (cavidades y vasos) y en la fisiología (funciones respiratoria y nutritiva, circulación, sístole y diástole) del músculo, en la angiología clásica y en la cartesiana. Para Descartes, el corazón, primer órgano en formarse y último en fallecer, constituye la fuente general de los movimientos del cuerpo por ser origen de los espíritus animales; éstos proceden de las partículas más sutiles que hay en la sangre. Prueba Bitbol, frente a Canguilhem, que Descartes defendió el carácter muscular del corazón, así como la alternancia, explicada por un proceso de fermentación, de las fases de dilatación y contracción de las aurículas con los ventrículos. Y confronta las tesis cartesianas con las defendidas por los predecesores: colección hipocrática, Aristóteles, Santo Tomás y Galeno, de los que aporta un buen resumen, cuando no un fino análisis (Aristóteles).

Sobre los precedentes vuelve a propósito de la circulación, donde recoge las dos metáforas de la antigüedad —la imagen de la irrigación, en virtud de la cual la sangre llega a todas las partes del cuerpo para alimentarlas y consumirse en la absorción, y la comparación con el canal de Euripa, que separa la isla de Eubea del continente griego y sigue un curso de flujo y reflujo—, para detenerse en el descubrimiento de Harvey en un contexto

netamente favorable de la escuela de Vesalio (Colombo, Acquapendente y Cesalpino). Descartes acepta resueltamente la teoría de la circulación, apartándose de un medio contrario a la misma que se resistirá casi hasta finales de siglo.

No sólo la acepta, sino que eufóricamente la extrapola allí donde Harvey jamás quiso: los espíritus animales, vieja remembranza del galenismo que Descartes convierte en efluvios sutiles de la sangre nacidos en el cerebro, vehiculados por los nervios y tamizados en la glándula pineal (la glándula H de Bauhin), sede ésta del alma y del sentido común. Necesitaba Descartes de esas entidades tan etéreas cuan artificiales para explicar su mecanicismo, pero muchos, mostrando su inexistencia, lo rechazaron de plano. Quizá sea este último el campo inexplorado de Bitbol que más se echa en falta. Por lo demás la obra se mantiene en un nivel de rigor.

Se ha ocupado varias veces Maria Teresa Monti de distintos aspectos de la obra de Albrecht von Haller; para ser más precisos, constituye el centro de su actividad profesional, como responsable de la reconstrucción del legado bibliográfico del enciclopedista bernés que se conserva en la Biblioteca Nacional Braidense de Milán. Diez largos años de fichas, de rastreo de su correspondencia, de identificación de sus escritos anónimos, le han permitido decantar el pensamiento de su biografiado en lo concerniente a dos puntos centrales en la ciencia del siglo XVIII: la irritabilidad y la embriogénesis.

Comienza ofreciéndonos el estado de la *quaestio halleriana*, en la introducción propiamente dicha y en el resumen biográfico subsiguiente. Por la primera se entera el lector de los problemas que emergen del saco sin fondo de los escritos infinitos (manuscritos, correspondencia, recensiones, colaboraciones enciclopédicas, libros y demás) de un médico que fue botánico, poeta, historiador, hombre público, filósofo y teólogo a la vez, amén de indicarle en qué situación se encuentran los estudios a él dedicados y recordarle los centros que guardan sus fondos. Desde la introducción, más, desde el prólogo (de Mario Dal Pra), se nos insinúa el papel que desempeñó la religión en la resolución del dilema preformismo-epigénesis. No creo que se pueda despachar tan sumariamente un asunto que, en muchísimos aspectos, es de pura filosofía natural. Y Monti parece de acuerdo en el capítulo cuarto.

Recrea la biografía de Albrecht von Haller (1708-1777) atendiendo, sobre todo, a su formación intelectual (en su Berna natal, en Tubinga, en Leiden, en Londres y en París), a su plenitud docente en Gotinga y a su última etapa de recapitulación, de nuevo en Berna. De su fase holandesa saldrá el Haller sistemático, seguidor de Boerhaave y de Hoffmann; también la asimilación de Newton vía Musschenbroek, que será en realidad el intermediario universal desde Uppsala hasta Lisboa, pasando por Valencia. En el dilatado período creador de Gotinga, escribe el grueso de su obra y pone a flor de piel su carácter polemista, al que le falta el punto de ironía y sarcasmo que tienen, por arrobas, sus enemigos (La Mettrie y Voltaire); aquilata entonces conceptos que ejemplifica con observaciones empíricas realizadas por él mismo; sus definiciones no tardan en convertirse en axiomas que se discutirán por toda Europa, como cuando afirma que la irritabilidad y la sensibilidad constituyen las facultades de determinadas partes del cuerpo que reaccionan por medio de la contracción o a través del dolor: la irritabilidad quedaría así limitada a los haces musculares y la sensibilidad se reservaría para las fibras nerviosas. Aunque solicitado por universidades y academias, no saldrá ya de Berna, desde 1753, donde conjuga funciones civiles con sus trabajos embriológicos.

La irritabilidad se halla ínsita en el sistema muscular. Monti rastrea el origen de la teoría fibrilar miológica en las obras escritas por Francis Glisson en la segunda mitad del siglo XVII, para avanzar luego en el desarrollo de esa explicación a través de sus expositores clásicos: Grew, Stensen, Malpighi, Muys. (La teoría fibrilar constituye el fundamento anatómico último, de plantas y animales, que se sustituirá en el segundo tercio del siglo XIX con la hipótesis celular.) Demuestra la autora especial habilidad para recomponer los distintos enfoques y análisis que justificaban la plena aceptación de la hipótesis. En el caso de Haller, esa habilidad se prolonga para trazar, en el cañamazo común de las hebras fundantes, las propiedades del sistema nervioso, justificante de la sensibilidad, y las del sistema muscular, verdadero y exclusivo reducto de la contracción irritable, repasando los experimentos de Haller y poniendo los límites de las conjeturas de su interpretación.

Brumosa es la relación halleriana entre estructura anatómica (tejidos muscular y nervioso) y dinamismo fisiológico (*vires insitae*). Niega la intervención directa del alma en el quehacer orgánico y rechaza la presencia de quimeras intermediarias, pero con la misma rotundidad desecha la reducción cartesiana de las manifestaciones de la vida a extensión y movimiento. Apela, en todo caso, a una valoración crítica (a una epistemología) de nuestros métodos de interpretación de las observaciones microscópicas y disecciones para situar debidamente el alcance de nuestros juicios.

Se esfuerza Monti en explicar las razones que llevaron a Haller a una adscripción sucesiva al preformismo animalculista de su juventud, la epigénesis en su madurez y el preformismo ovista en sus años de retiro en Berna. La conclusión general viene a ser que no se produjo un corte abrupto en las dos últimas etapas, a pesar de la incoherencia aparente de una y otra teoría sobre la "evolución", así se llamaba, del embrión. Se empeña, en efecto, en mostrar la distancia que separa el epigenismo materialista de un Buffon, del que no le aleja tanto su discrepancia con la idea del *moule intérieur* que propugna el francés, cuanto su labia desenfrenada y carente de apoyo observacional. Haller admite un desarrollo progresivo y acorde con un plan inscrito, plan que, en su fase preformista, adquiere mayor fuerza hasta convertirse en determinante, sirviendo de puente la osteogénesis. A muchos nos habría gustado que Monti hubiera prestado más atención al hervidero de tesis embriológicas (regeneración, partenogénesis) del segundo tercio del XVIII que a la cuestión religiosa que le plantea Buffon.

La autora da lo mejor de sí en el capítulo cuarto, compendio y fin de la obra. Sin negar las motivaciones religiosas extrínsecas del preformismo halleriano, asevera y prueba que el desarrollo intrínseco es de corte netamente observacional. El de Berna no avanza un paso sin que tenga, fechado, el protocolo del experimento. Anota aquélla las limitaciones y hallazgos de otros intérpretes (Mazzolini y Adelmann, sobre todo), apoyada, a su vez, con el dominio de las fuentes inéditas. Sabe partir del centro del problema: la manifestación del primordio cardial en la yema del huevo y las evoluciones que seguirá hasta el acabamiento del embrión; con ello va introduciendo al lector en el descubrimiento de nuevos órganos, de nuevos términos, que la historia de la embriología va aportando a la anatomía general en los decisivos siglos XVI, XVII y XVIII. Si Monti se libera de otras interpretaciones, que en ciertos momentos hacen pesada la lectura porque atenazan la redacción, la edición crítica que nos promete de algunas obras de Haller será de obligada consulta. (L. A.)

Apuntes

Si la biodiversidad mayor del mundo animal corresponde al universo de los insectos, la del mundo vegetal pertenece a los hongos; de éstos, aunque sólo se han registrado unas 69.000 especies, podría haber más de millón y medio, entre Protozoos, Cromista y Hongos propiamente dichos. Los últimos estudios han contabilizado una proporción de planta vascular a hongo en torno a 1:5 en promedio, fracción que se compadece bien con su interés en la mayoría de los ecosistemas, donde cumplen misión descomponedora, crean suelos y preparan la colinización vegetal, amén de asegurar luego la radiación estableciendo lazos mutualistas.

Se ha detectado metano fuera del sistema solar. Los astrofísicos que han descubierto el más elemental de los hidrocarburos saturados en nubes frías alrededor de estrellas jóvenes dicen que se halla en fase gaseosa y en fase sólida (un manto quizá sobre granos de polvo). No entraña especial dificultad explicar que puedan darse ambas formas, pero sí a la vez o coexistiendo, porque hay menos gas que cuanto cabría esperar de la evaporación de las capas de los granos. Para resolver la aporía se supone que el gas metano debería hallarse implicado en las reacciones químicas que se desarrollen en el interior de las nubes moleculares.

La órbita de los cometas puede ser elíptica o hiperbólica. Sus dimensiones se caracterizan por el eje semimayor, a; la energía orbital es proporcional a $-1/a$. Penetran en el sistema solar interno procedentes de la nube de Oort, una suerte de aprisco de cometas que dista 10^4 unidades astronómicas del Sol. Gracias a los efectos perturbadores de los encuentros planetarios, podemos calcular la energía orbital original, y es negativa o positiva de acuerdo con el carácter geométrico de la órbita. Además de las correlaciones conocidas, recordemos la energía original con la distancia en su paso más cercano al Sol, hay que añadir ya otra nueva: los cometas hiperbólicos prefieren seguir órbitas retrógradas.

La historia de la ciencia, cuando lo que se hace es digno de tal nombre, evita, por lo menos, descubrir varias veces el Mediterráneo: desde el redescubrimiento de las leyes de Mendel a principios del siglo XX hasta el ''hallazgo'', por tres veces, de la teoría de la LIA (aproximación local inducida, relativa al movimiento de un vórtice tubular en un medio fluido) a lo largo de nuestra centuria, pasando por la resolución de la paradoja de Olbers, en 1964 y 1990. La ignorancia de la labor ajena consume horas perdidas, amén de crear injustas prioridades. Aunque más de un suspicaz pudiera poner en duda la veracidad de tales ''reinvenciones''. Parece, por lo pronto, probado que en el caso de los redescubridores de Mendel hubo silencio de las fuentes manejadas.

El resultado más notable de la actividad convectiva del manto terrestre lo constituyen las plumas, chorros de materia caliente que dan cuenta de las cadenas de islas volcánicas. Hace un par de años comenzaron a aparecer pruebas de la existencia de superplumas, con cabezas activas de 2000 kilómetros de diámetro, formadoras quizá de las mesetas oceánicas, hipótesis ésta que se ha asentado ahora con la identificación de una superpluma del Cretácico medio (hace 120-80 millones de años) que afectaría a una zona extensa del Pacífico.

La prueba más contundente de la capacidad que posee el microscopio de efecto túnel de manipular átomos uno a uno se ha conseguido con la construcción de un conmutador atómico, que transporta átomos de xenón de la punta del microscopio a la superficie del substrato (cristal de níquel), y a la inversa. La conductancia eléctrica de la punta al substrato depende de la posición del átomo: es baja cuando el átomo se halla en el substrato y, alta, cuando está en la punta del microscopio. El conmutador en cuestión es un elemento biestable, pieza imprescindible en la fabricación de microcircuitos.

La colonización humana de Marte es un tema recurrente, aunque apenas aireado por el temor justificado de los astrobiólogos a la irrisión de sus colegas, dadas sus connotaciones con la literatura de fantasía científica. Sin abandonar los modelos generales que abordan las condiciones de habitabilidad (transformación del clima e introducción paulatina de microorganismos y vegetales para la progresiva asimilación al entorno terrestre), se está ya profundizando en aspectos sectoriales; por ejemplo, en los ciclos hidrológicos que tuvo antaño el planeta rojo, atravesado por ríos, salpicado de lagos y glaciares y bañado por un océano septentrional inmenso. Porque, si tuvo vida, en los sedimentos de estas formaciones deben residir los restos fósiles.